

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

NAVAŘOVÁNÍ OTĚRUVZDORNÝCH MATERIÁLŮ  
OVERLAYING WITH WEAR-RESISTANT MATERIALS

AUTOR: Martin Hoffmann

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.

PRAHA 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hoffmann** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **438584**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Navařování otěruvzdorných materiálů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Overlaying with wear-resistant materials**

Pokyny pro vypracování:

Přehled návarových materiálů s jejich aplikací pro různé typy opotřebení. Navaření vybranými návarovými materiály. Zkoušky tvrdosti, metalografická analýza, zkoušky opotřebení.

Seznam doporučené literatury:

Vocel, M. - Dufek, V.: Tření a opotřebení strojních částí.  
Suchánek, J. - Kuklík, V. - Zdravecká, E.: Abrasivní opotřebení materiálů. Vydavatelství ČVUT, Praha 2006  
Články v časopisech Zváranie, Wear, Tribology International  
Katalogy výrobců přídavných materiálů.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Jan Suchánek CSc., ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **25.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2017**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Martin Hoffmann

Počet stran: 50

Počet obrázků: 32

Počet tabulek: 6

Počet vztahů: 10

## **Abstrakt**

Procesy opotřebení zahrnují široké spektrum případů snižování funkčnosti a spolehlivosti kovových i nekovových materiálů. Jejich studiu je věnována velká pozornost. Abrazivní opotřebení je jedním z nejvíce zkoumaných druhů opotřebení. S abrazivními částicemi přicházejí do kontaktu nástroje pracující například v důlním nebo zemědělském průmyslu. Životnost je působením těchto částic snižována.

Práce popisuje současné představy o opotřebení a možnostech ochrany proti abrazivnímu opotřebení. Experimentální část se zabývá otestováním čtyř druhů otěruvzdorných návarů na zařízení s pryžovým kotoučem sestaveným podle normy ASTM G65 a stanovením relativní odolnosti proti abrazivnímu opotřebení u těchto druhů návarových materiálů.

**Klíčová slova:** degradační procesy, abraze, opotřebení součástí, navařování, odolnost proti abrazi.

## **Abstract**

Wear processes include a wide range of downsizing of reliability of metallic and non-metallic parts. Abrasive wear is one of the most frequently studied types of wear. Abrasive particles come into contact with parts in the mining or agricultural industry and lifetime of these parts is reduced by the action of these particles.

The aim of this study is to describe state-of-the-art of wear and protection against abrasion wear. Part of the thesis is also testing of four types of overlays on a device with rubber wheel (in accordance to ASTM G65)

The output of the experiment is the values of resistance against abrasive wear of selected four types of overlays.

**Keywords:** degradation processes, abrasion, component wear, overlaying, resistance against abrasion.

**Poděkování:**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Janu Suchánkovi, CSc. a konzultantovi Ing. Karlu Kovandovi, Ph.D., IWE za pomoc a odborné rady při realizaci praktické části a vypracování této bakalářské práce.

# Obsah

1	ÚVOD.....	10
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	11
2.1	Tření a opotřebení v technice .....	11
2.2	Definice základních druhů opotřebení .....	13
2.2.1	Adhezivní opotřebení .....	17
2.2.2	Abrazivní opotřebení .....	18
2.2.3	Erozivní opotřebení .....	21
2.2.4	Kavitační opotřebení .....	21
2.2.5	Únavové opotřebení.....	22
2.2.6	Vibrační opotřebení.....	22
2.3	Odolnost a ochrana materiálů proti opotřebení .....	24
2.3.1	Oceli obvyklých jakostí .....	24
2.3.2	Ušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli .....	24
2.3.3	Nízkolegované konstrukční oceli .....	25
2.4	Ochrana proti opotřebení .....	25
2.4.1	Adhezivní opotřebení mezi dvěma kovovými povrchy.....	26
2.4.2	Ochrana proti rázům nebo vysokým tlakům .....	26
2.4.3	Abraze jemnými minerálními částicemi (2 - body abraze) .....	26
2.4.4	Abraze mezi dvěma povrchy (3 - body abraze) .....	26
2.5	Navařování otěruvzdornými materiály .....	27
2.5.1	Typy návarových materiálů .....	27
2.6	Hodnocení odolnosti materiálů proti abrazi .....	29
2.7	Přístroje pro testování odolnosti proti abrazi .....	30
2.7.1	Přístroje s vázanými abrazivními částicemi .....	30
2.7.2	Přístroje s volnými abrazivními částicemi .....	30
2.7.3	Přístroj s pryžovým kotoučem .....	30
2.7.4	Přístroje s vrstvou částic mezi dvěma stykovými povrchy a přístroje pro testování reálných podmínek provozu .....	33
3	PRAKTICKÁ ČÁST.....	35
3.1	Výběr a příprava vzorků před navařováním .....	35
3.2	Druhy navařovaných materiálů.....	35
3.2.1	ESAB OK 83.28 .....	36
3.2.2	ESAB OK 84.78 .....	36
3.2.3	ESAB OK 84.84 .....	36
3.2.4	ESAB OK 86.08 .....	37
3.3	Provádění návarů .....	37
3.4	Obrábění vzorků po navařování.....	38



<b>3.5</b>	<b>Metalografická analýza .....</b>	<b>41</b>
3.5.1	Makrotvrdost.....	43
<b>3.6</b>	<b>Testování vzorků na přístroji s pryžovým kotoučem a výsledky měření .....</b>	<b>43</b>
<b>3.7</b>	<b>Zhodnocení experimentu .....</b>	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>POUŽITÉ ZDROJE A LITERATURA .....</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM VZTAHŮ.....</b>	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>50</b>

## 1 Úvod

Problematika opotřebení je v technice jedno z nejprobíranějších témat. Určení životnosti a tím také technologie použité na výrobu je klíčové pro uplatnění na dnešním trhu, který je přesycen výrobky všech kategorií a kvalit. Pro výrobu produktů splňujících kritéria spolehlivosti a konkurenceschopnosti je zapotřebí dobře se orientovat v principech opotřebení a v možnostech, jak opotřebení zabránit. Cena výrobku, kterou určuje zpravidla trh, je předem daná a konstrukce ve spolupráci s technologií musí dokázat výrobek navrhnut a vyrobit v požadované kvalitě za co nejnížší náklady. Znalost principů opotřebení umožňuje vyhnout se zbytečnému naddimenzování výrobku a tím zlepšit konkurenceschopnost na trhu.

Uvádí se, že přibližně polovina opotřebení je způsobena opotřebením abrazivním, a proto se tato práce zabývá především tímto druhem opotřebení. Chránit materiál před abrazí lze více způsoby. Například otěruvzdornými povlaky, tepelným nebo chemicko-tepelným zpracováním, návary a nástřiky, ale tato práce se zabývá pouze otěruvzdornými návary.

Cílem práce je popsat základní druhy opotřebení, druhy návarových slitin vhodných pro různé aplikace, jako například otěr sypkými částicemi, abraze spojená s rázy, nebo dynamickým zatížením. Náplní experimentální části byla především příprava a otestování čtyř druhů návarových slitin na přístroji s pryžovým kotoučem testujícím odolnosti proti abrazivnímu opotřebení.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Tření a opotřebení v technice

Vlivem rychle se rozvíjející průmyslové techniky jsou na stroje a nástroje kladeny větší nároky. S rostoucí spotřebou lidstva roste i potřeba výkonnějších strojů, rychlejší těžby a zpracování většího objemu materiálu vlivem vyčerpaných zásob čistých a kvalitních surovin. A právě vysoké výkony a rychlosti zpracování kladou vyšší nároky na materiály styčných ploch strojů, na jejich opravitelnost či výměnu. Plochy styku strojních součástí, jako jsou například ložiska či plochy válců motorů, lze chránit například mazáním. Plochy, které přichází do styku se zpracovávanou surovinou, například dláto radlice pro orbu zeminy, musí být velice tvrdé na povrchu a zároveň houževnaté v jádře. Dochází zde k neustálému tření suroviny a nástroje a tím dochází k opotřebovávání povrchu, k úbytkům materiálu, snížení funkčnosti nebo poruchám a haváriím strojů. Proti takovému opotřebení je potřeba součásti chránit (nebo již tak vyrobit) a prodloužit jejich životnost tak, aby vydržely potřebnou dobu. [1; 2]

Při obrábění, pluhování, drcení, apod. dochází k dotyku nástroje a zpracovávaného materiálu, tato dvě tělesa si v prvním momentě dotyku vymezí styčnou plochu. Po vzájemném dotyku dvou těles by mělo dojít k vymezení jejich vzájemné polohy teoreticky ve třech bodech, kterými jsou nejvyšší výčnělky nerovných povrchů. V okolí těchto bodů jsou povrchy odděleny, či vyplněny okolním médiem. Prakticky je však měrný tlak na tyto styčné body tak veliký, že dochází k elastické (pružné) a plastické (tvárné) deformaci, dotyk se uskutečňuje v dalších nových bodech a to tak dlouho, až vznikne dostatečně velká plocha, aby unesla dané zatížení. [1; 2]

Tření je odpor proti pohybu, vznikající mezi dvěma tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tečném směru k nim. Toto bylo definováno již koncem 15. století Leonardem da Vincim. Koncem 17. století byl použit francouzským inženýrem Guillaumem Amontonssem poměr třecí síly a přítláčné síly, který je pro stejné podmínky konstantní a který byl později zaveden pod pojmem součinitel tření. Tento princip byl doložen řadou experimentů na konci 18. století Charlesem-Augustinem de Coulombem, a proto je dnes označován jako Coulombův zákon (Vztah. 2.1). [1; 2]

$$\mu = \frac{F_t}{F_n}$$

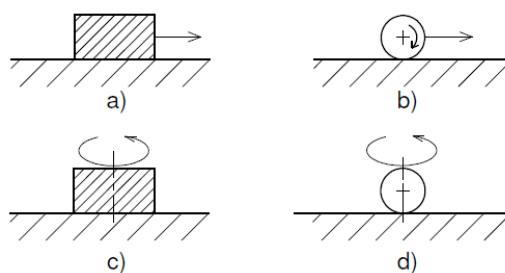
Vztah 2.1. Coulombův zákon [1]

Třecí síla  $F_t$  působí proti směru pohybu, přítláčná síla  $F_n$  působí kolmo ke směru pohybu a  $\mu$  je součinitel tření. [1]

Tření se dá rozdělit na *kluzné (a)*, *valivé (b)* a jejich kombinace. Kluzné tření vzniká při vzájemném kluzném pohybu dvou těles. Valivé při odvalování dvou těles (Obr. 2.1). [2]

Tření je také možné rozdělit na tzv. *tření v klidu* a *tření za pohybu*. Třením v klidu se rozumí odpor proti působení vnější síly před tím, než dojde k vzájemnému pohybu těles. Ve chvíli, kdy je síla dostatečná k překonání tohoto odporu, dojde k pohybu těles vůči sobě a adheze se změní z „tření v klidu“ na „tření za pohybu“. [2]

Jsou známy také případy nerovnoměrného prokluzu těles, kdy rychlost relativního pohybu těles není ve všech bodech styku stejná (například kotoučová brzda, talířová spojka) (c). Zvláštním příkladem je tzv. *vrtné tření (d)*, kde přesně v ose rotace je relativní rychlost pohybu teoreticky nulová. [2]



Obr. 2.1. Případy relativního pohybu těles [2]

V případech, kdy je tření nežádoucí, se používají maziva, která adhezi snižují. Podle toho je rozděleno tření na:

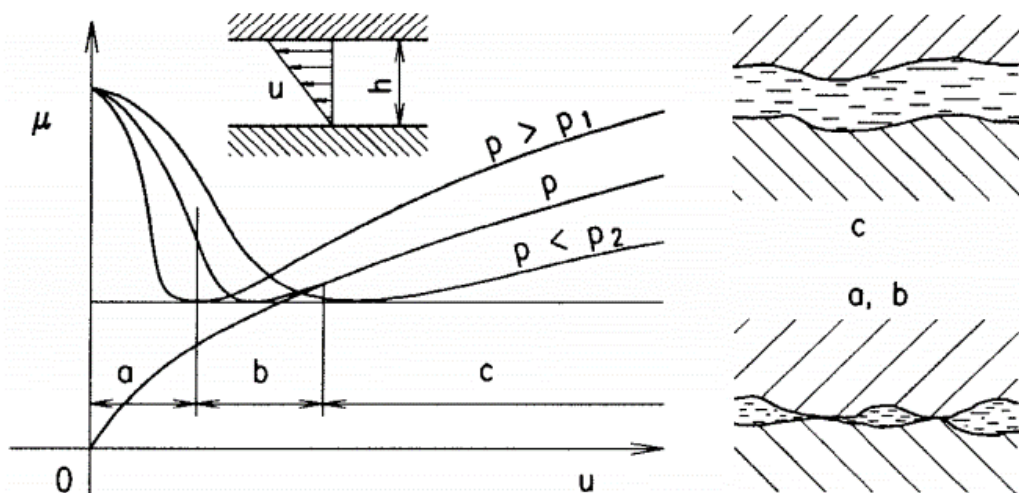
*suché* – tzn. bez maziva, v tomto případě jde teoreticky o tření dvou čistých materiálů. V reálném styku dvou těles ale vždy figurují další látky, jako jsou plyny nebo vlhkost adsorbovaná povrchem těles nebo oxidické vrstvy,

*kapalinné (elastohydrodynamické)* – jsou-li povrchy odděleny při tření vrstvou maziva nebo jiného kapalného média,

*mezí* – je limitní případ kapalinného tření, kdy se vlastnosti tenké vrstvy (několik molekul) kapaliny liší od jejích vlastností objemových,

*smíšené* – jde o případ, kdy dochází k občasným dotekům mikro-nerovností povrchů stýkajících se těles i přes přítomnost maziva.

Principy mazání používané v praxi byly experimentálně zjišťovány německým vědcem Richardem Stribeckem. Jeho pokusy byly zaměřené na závislost součinitele tření na rychlosti vzájemného pohybu stykových ploch. Styčné plochy byly mazány, takže při vyšších rychlostech docházelo ke kapalnému tření. Tuto závislost vyjadřují tzv. Stribeckovy křivky (Obr. 2.2). [1]



Obr. 2.2. Stribeckovy křivky závislosti součinitele tření  $\mu$  na rychlosti  $u$  [1]

Se zvyšující se rychlostí přechází oblast suchého tření (a) do oblasti tření smíšeného (b) a následně kapalného (c), kdy se vrcholky výstupků na povrchu těles přestanou dotýkat a tím pádem se zastaví opotřebení. Opačně je tomu s velikostí přitlačné síly (měrného tlaku  $p_1, p, p_2$ ), která zvyšuje součinitel tření. [1]

## 2.2 Definice základních druhů opotřebení

*„Opotřebení je nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává“ [2].*

*„Opotřebení je progresivní ztráta materiálu z povrchu pevného tělesa v důsledku mechanického působení, tj. kontakt a relativní pohyb proti pevnému, kapalnému nebo plynnému médiu.“ [3]*

Opotřebení bylo popsáno více způsoby. Jeden z nejjednodušších popisů byl založen na přítomnosti nebo absenci kluzného média. Další možností bylo rozdělení opotřebení podle působících mechanismů, což ale bylo ve většině případů komplikované z důvodu přítomnosti více mechanismů opotřebení najednou a také proto, že poznatky pocházely z různých odvětví a zkušeností a nedaly se jednoduše srovnat. Ve výsledku nebyl žádný z nich uznán jako univerzální, přestože měly většinou stejné rysy. Obrázky 2.4 a 2.5 ukazují dva druhy rozdělení opotřebení založené na práci Petera J. Blaua (Obr. 2.4) a Kennetha G. Budinskiho (Obr. 2.5). Blauem byly rozděleny procesy opotřebení do tří kategorií podle druhu vzájemného styku těles, kterými byly posuvný, nárazový a valivý (Obr. 2.4). Rozdělení opotřebení dle Budinskiho bylo do čtyř kategorií, kterými byly, abraze, eroze, adheze a únava povrchu (Obr. 2.5). Třetí způsob klasifikace je přehledný a široce uznávaný. Je založen na písemném popisu způsobu styku materiálů a podmínek, při kterých ke styku došlo, např. (Obr. 2.3) [4]

### **Kov ve styku s neželezným abrazivem**

Vysokonapětové rýhování nebo obrus:

*Mokrý, kuličkový nebo válečkový omílače*

*Suchý, čelistový nebo válcový drtiče rudy*

Nizkonapětové rýhování nebo klouzání:

*Mokrý, například šroubové dopravníky mokrého písku*

*Suchý, pluhy nebo zemědělské zařízení pracující v suché půdě*

Nárazy volného abraziva:

*Mokrý, například lopatky v kalových čerpadlech*

*Suchý, například pískování*

### **Kov ve styku s kovem**

Kluz:

*Mazané, např. křížák v motoru, nebo čep v ložisku*

*Nemazané, kohouty, matice, svěrky*

Odvalování:

*Mazané, jako například valivá ložiska a převody*

*Nemazané, například kola vlaku*

### **Kapalina nebo pára sražená na kovech**

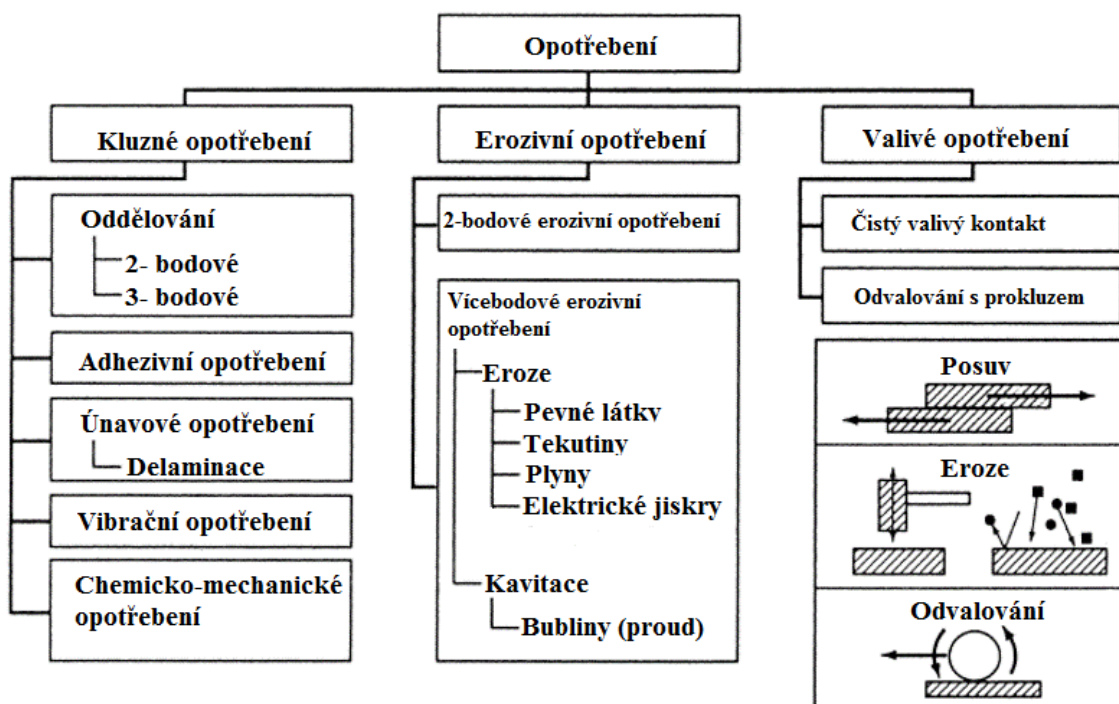
*Mokrý pára, např. v turbínách*

*Spaliny v plynových turbínách*

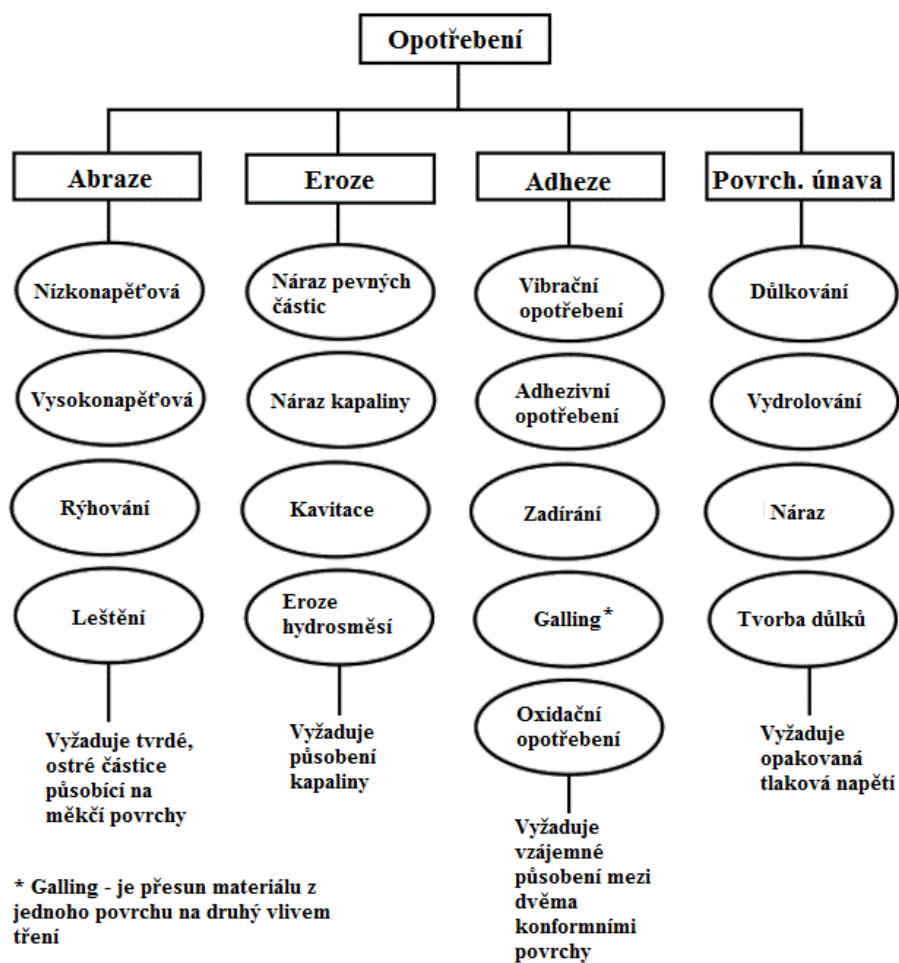
*Voda, například lopatky čerpadel*

*Kavitace, jako v turbulentních, rychle proudících kapalinách*

Obr. 2.3. Slovní rozdělení způsobů a podmínek styku těles [4]



Obr. 2.4. Rozdělení opotřebení podle Petera J. Blaua [4]



Obr. 2.5. Rozdělení způsobů opotřebení podle Kennetha G. Budinskiho [4]



Norma ČSN 01 5050, která určuje názvosloví v oblasti opotřebení materiálu, je od roku 2007 neplatná. Názvosloví uvedené v této normě se však stále používá, a proto je níže uvedeno 6 základních druhů opotřebení, které uvádí tato norma. Obr. 2.6 [5]

Adhezivní opotřebení – přenos částic, rýhování, vytrhávání

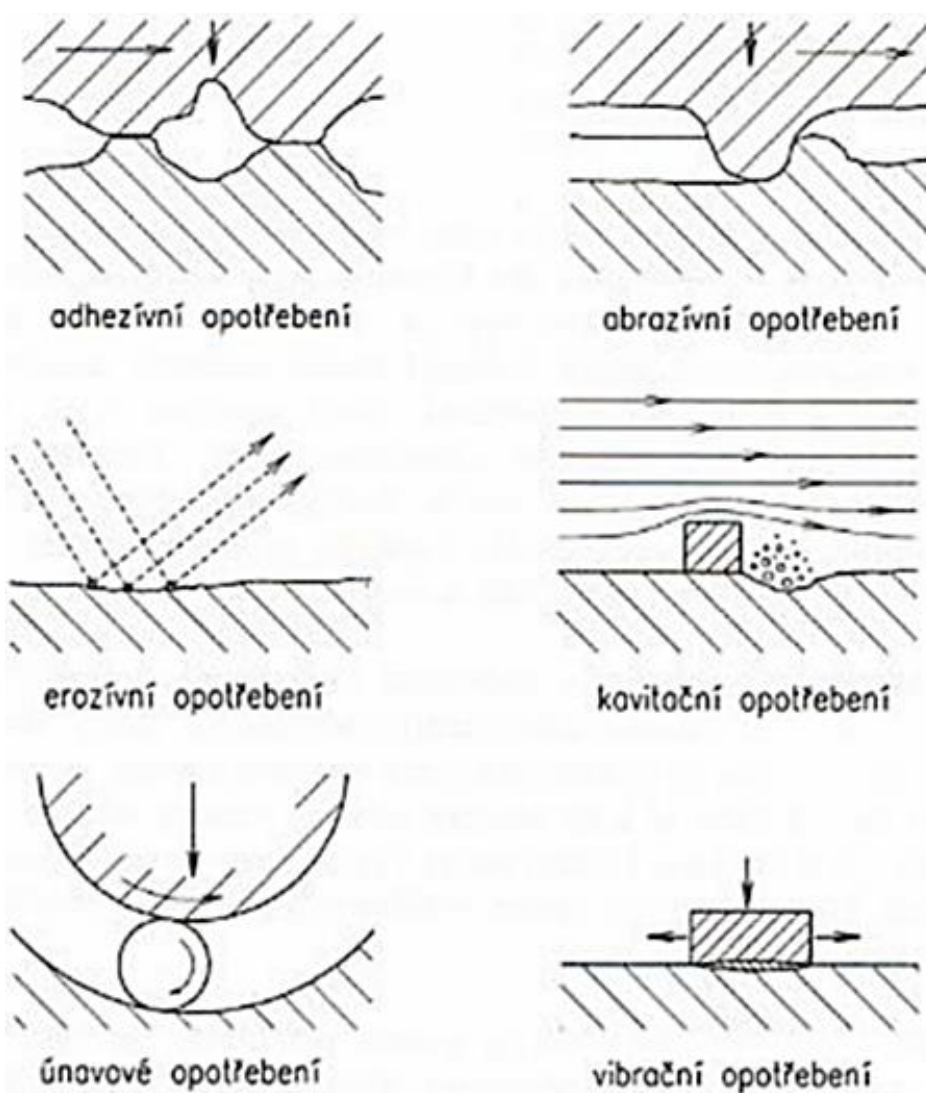
Abrazivní opotřebení – oddělování částic, rýhování

Erozivní opotřebení – dopad částic na funkční povrch

Kavitační opotřebení – oddělování částic v oblasti zanikání kavitačních bublin

Únavové opotřebení – poškození součásti vlivem cyklického namáhání

Vibrační opotřebení – poškození vlivem vibrací



Obr. 2.6. Schematické znázornění hlavních druhů opotřebení a charakteru poškození funkčních povrchů [1]



### 2.2.1 Adhezivní opotřebení

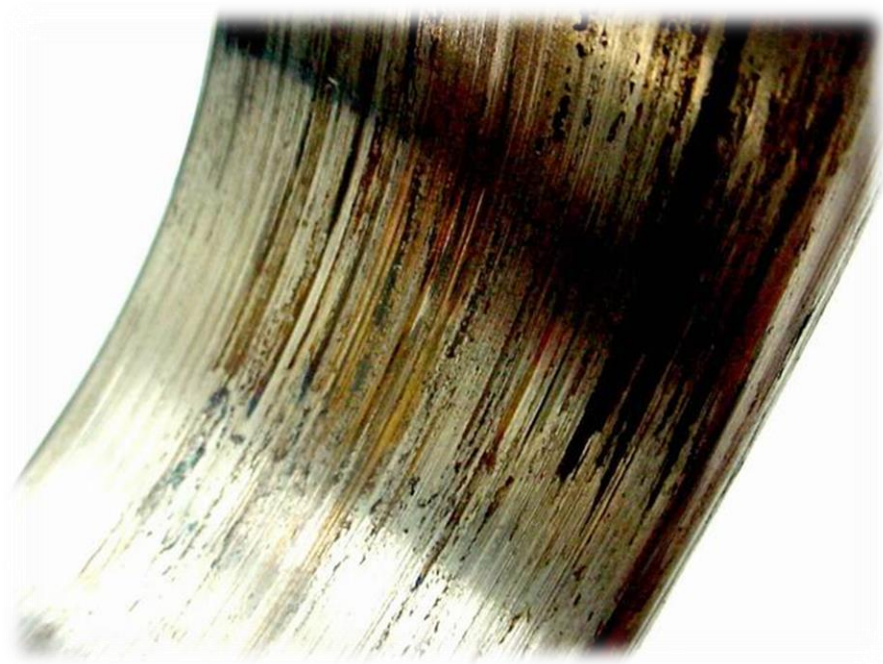
K opotřebení dochází oddělováním a přemísťováním částic z míst, kde při relativním pohybu funkčních povrchů došlo k jejich vzájemnému dotyku, porušení povrchových vrstev (olejového filmu, oxidických vrstev) a kovovému styku obou materiálů. K adhezivnímu opotřebení dochází porušováním mikrospojů vzniklých interakcí povrchových nerovností, kdy dojde k částečnému natavení nerovností vzájemným tlakem a otěrem, svařením těchto nerovností k sobě a následným utržením spoje k jedné nebo druhé součásti. [1; 2]

Faktory, které mají zásadní vliv na vznik adhezivního opotřebení, jsou:

- hloubka vniku a poloměr zakřivení mikronerovností
- zatížení a rychlost relativního pohybu
- schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje

Na intenzitu adhezivního opotřebení mohou mít významný vliv například oxidické vrstvy, nebo mazivo mezi funkčními povrchy materiálů. [1; 2]

V praxi se rozlišují různé intenzity vlastního opotřebení podle podmínek a intenzity působících faktorů od mírné formy až po intenzivní formu, tzv. zadírání. [1; 2]



Obr. 2.7. Adhezivní opotřebení pánve kluzného ložiska [6]

### 2.2.2 Abrazivní opotřebení

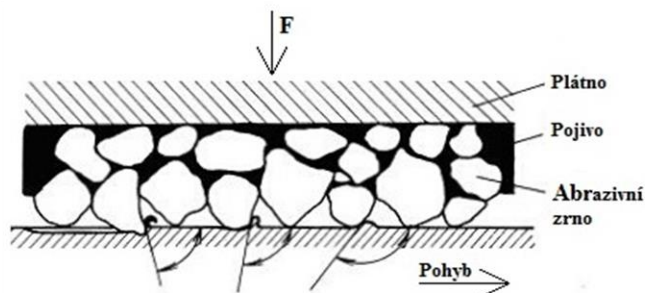
Abrazivní opotřebení je jedním z nejčastějších druhů opotřebení strojních součástí. Uvádí se, že podíl případů opotřebení strojů abrazivním opotřebením je přes 50%. [1; 2; 7]

Abrazivním opotřebením se nazývá oddělování částic z funkčního povrchu vlivem tvrdosti a drsnosti druhého povrchu, se kterým přijde do kontaktu, nebo vlivem abrazivních částic. Na funkčním povrchu dojde k vydírání materiálu a rýhování. Abrazivní opotřebení je rozdělováno na dva hlavní případy, kdy v prvním dochází k otěru funkčního celku tvrdými částicemi (2 - body abraze) a v druhém jde o opotřebení dvou funkčních celků, mezi kterými jsou abrazivní částice (3 - body abraze). [1; 2; 7; 8]

V prvním případě jde o interakci dvou těles. Typickým případem jsou například radlice či dopravníky sypkých materiálů. [1; 2; 7]

V případě druhém jde o interakci tří těles. K tomuto případu dochází ve většině pohyblivých spojů, které nejsou naprosto uzavřeny před okolním prostředím. Typicky k tomuto případu dochází v čepech, vodítkách, pohybových mechanismech strojů, apod. [1; 2; 7]

Při opotřebení čepů či kluzných ložisek vlivem abrazivních částic obsažených v mazivu dochází často k paradoxnímu jevu, kdy je více opotřebováván tvrdý čep a nikoli měkká výstelka ložiska. Je to způsobeno tím, že abrazivní částice se do měkké výstelky ložiska zamáčknou a vyčnívajícími výstupky pak rýhují tvrdý čep. [1; 2; 7]



Obr. 2.8. Působení brusného plátna na opotřebovávaný povrch [7]

Na obrázku 2.8 je znázorněn mechanismus opotřebení abrazivní částicí. Tvar a sklon abrazivní částice má zásadní vliv na způsob namáhání opotřebovávané plochy.

Existují dva extrémní případy abrazivního opotřebení.

V prvním případě dochází vlivem vzájemného pohybu funkčního povrchu a částice k plastické deformaci. Plastická deformace se tvoří před abrazivní částicí vlivem jejího zatlačování do funkčního povrchu a jejího pohybu. Tento nárůstek je kontinuálně vytlačován do boku. Vzniká rýha s hranami vystupujícími nad povrch funkčního povrchu. Nedochozí zde k oddělování materiálu. Otěr materiálu je v tomto případě způsoben vyčerpáním deformační schopnosti poškozovaného materiálu a jeho následnou delaminací. [1; 2; 7]

Odlišným případem je tvorba rýh spojená s odstraňováním materiálu povrchu mikrořezáním. V extrémním případě tohoto druhu otěru dochází k odstranění materiálu abrazivní částicí pouze ve formě třísky a vystouplé valy na okraji rýhy se netvoří. [1; 2; 7]

U houževnatých materiálů může docházet k porušení povrchu vlivem únavy materiálu. Únava povrchu materiálu může být způsobena buď vysokocyklovým kontaktním únavovým procesem (částice do povrchu nepronikají, dochází zde k cyklické elastické deformaci povrchu), nebo nízkocyklovým kontaktním únavovým procesem (částice pronikající do povrchu způsobují elastickou deformaci). [1; 2; 7]

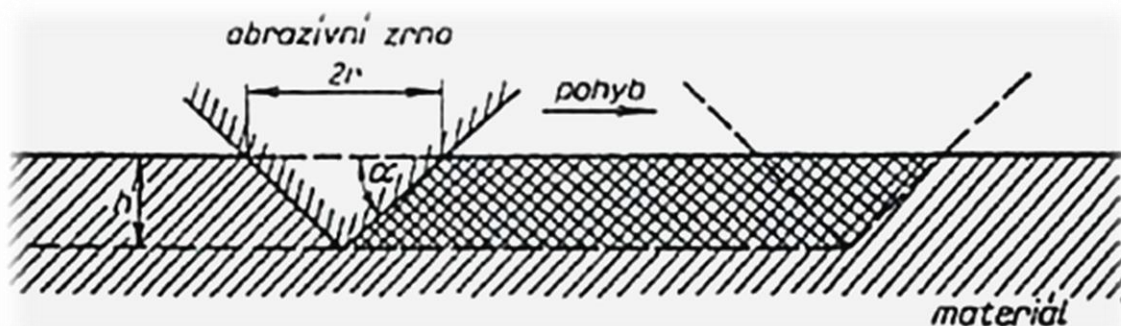
Při vysokých rychlostech abrazivních částic vůči funkčnímu povrchu dochází také k zahřívání materiálu v okolí styku těles a je potřeba proto uvažovat také tepelné ovlivnění funkčního materiálu a abraziva. Je nutné věnovat pozornost i případné chemické reakci s okolním prostředím. [1; 2; 7]

Zjednodušený model abrazivního opotřebení kuželovou nerovností byl popsán **Rabinowiczem**. Pro rovnováhu sil na obr. 2.9 platí vztah 2.2. [7]

$$F = p_m r^2$$

Vztah 2.2. Vztah rovnováhy sil k obr. 3.7. [7]

$p_m$  – tvrdost povrchu (tlak potřebný k dosažení plasticity povrchových vrstev materiálu).  
 $r$  – poloměr vtisku v úrovni původního povrchu [7]



Obr. 2.9. Zjednodušený model interakce abrazivní částice s opotřebovávaným povrchem podle Rabinowicze [7]

Při pohybu kužele po dráze  $l$  se odstraní objem materiálu  $dW_0$

$$dW_0 = r \cdot h \cdot dl = \frac{F \cdot \operatorname{tg} \alpha}{p_m \cdot \pi} \cdot dl$$

Vztah 2.3. Objem materiálu odstraněný tělesem po dráze  $l$  [7]

Celkový objem odstraněného materiálu (tj. objemový otěr  $W_0$ ) je však výsledkem působení velkého množství abrazivních částic s různým úhlem  $\alpha$ , a proto platí vztah 2.4. [7]

$$W_0 = K_{abr} \cdot \frac{F \cdot l}{p_m}$$

Vztah 2.4. Celkový objem odstraněného materiálu [7]

$K_{abr}$  – průměrný  $tg$  všech abrazivních částic v daném případě. Podle Rabinowicze jsou obvykle hodnoty  $K_{abr}$  v mezích  $2 \cdot 10^{-1}$  až  $2 \cdot 10^{-2}$  [7]

Je prokázáno (Kragelskij), že deformace povrchu materiálu je závislá především na poměru  $h/R$ , kde  $h$  je hloubka vtisku a  $R$  je poloměr vnikající částice či nerovnosti. [7]

$h/R = 0,01 \div 0,0001$  – jedná se o elastickou deformaci

$h/R = 0,1 \div 0,2$  – jedná se o plastickou deformaci

$h/R > 0,1 \div 0,2$  – jde o rýhování

Na otěr má zásadní vliv rozdíl tvrdostí funkčního materiálu a abraziva. Pokud je funkční povrch znatelně měkčí než abrazivo, je odolnost proti abrazivnímu opotřebení malá. Maximální hodnoty odolnosti proti otěru funkční povrch dosáhne přibližně při 60% tvrdosti vůči abrazivu. [7]

Je nezbytné vzít v úvahu, že materiály jako například oceli nejsou plně homogenní. Bývá měkčí matrice, která nese velice tvrdé částice, ale odolnost proti otěru výsledného materiálu **nemusí** být přímo úměrná makrotvrdosti tohoto materiálu, i když tvrdost má na odolnost proti opotřebení zásadní vliv. U ocelí a litin závisí odolnost proti abrazivnímu opotřebení na pevnosti základní kovové hmoty a na obsahu karbidů. Podle chemického složení, tepelného zpracování a mikrostruktury mohou mít oceli a litiny velmi rozdílnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. [7]

Abrazivní opotřebení se dá podle intenzity rozdělit takto:

*Malá intenzita abrazivního opotřebení* – Většinou jsou takto označovány případy, kdy jde o otěr sypkými materiály (2 - body abraze) nebo částicemi s nízkou pevností či při malých rychlostech relativního pohybu. Běžné řešení je použití ocelových plechů či profilů bez tepelného zpracování. Typickým představitelem je otěruvzdorný plech z oceli typu Hardox. [7]

*Střední intenzita abrazivního opotřebení* – typicky zemědělské nástroje, těžební nástroje, apod. V tomto případě vzniká silové působení mezi funkční plochou a abrazivem, dochází zde ke zpevňování povrchové vrstvy materiálu. Otěr lze omezit použitím vysokopevných ocelí či otěruvzdorné bílé litiny. [7]

*Vysoká intenzita abrazivního opotřebení* – drcení tvrdých materiálů a nerostných surovin, kde se dosahuje na funkčním povrchu maximálních silových účinků. V těchto případech se nejčastěji používá houževnatá manganová austenitická ocel a její modifikace. Při velkém silovém zatížení pak dochází ke zpevnění funkčního povrchu

až do hloubky několika milimetrů v důsledku strukturních změn a ocel tak dobře odolává opotřebení. [7]

### 2.2.3 Erozivní opotřebení

O erozivním opotřebení se hovoří, pokud je funkční povrch poškozován částicemi nesenými proudem kapaliny, plynu či kapkami páry. V praxi se jedná o opotřebení součástí čerpadel, turbín, potrubí, ventilátorů, nebo třeba náběžných hran rychle letících letadel apod. [1; 2]

Intenzitu erozivního opotřebení ovlivňuje velké množství faktorů, které se vztahují jak k působícímu médiu a částicím, které obsahuje, tak i k částicemi vystavenému povrchu. Rozhodující roli zde hraje relativní rychlost, teplota a chemické působení nosného média. Velký vliv mají druh, velikost, tvar a tvrdost částic. Síla účinku je závislá na kinetické energii a úhlu dopadu částic na funkční povrch. [1; 2]

Na rozdíl od adhezivního a abrazivního opotřebení, kde dochází k úbytku vrcholků nerovností povrchu, zde vlivem turbulencí proudícího média dochází k úbytkům materiálu i na nejnižších místech funkčního povrchu. Pro erozivní opotřebení je typický nerovnoměrný úbytek materiálu. [1; 2]

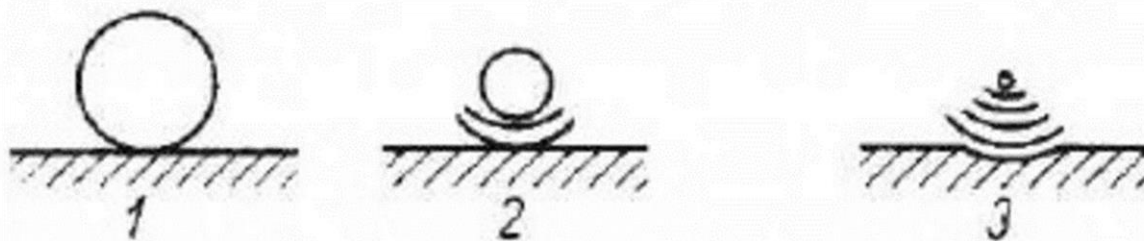
Obr. 2.10 znázorňuje typicky nerovnoměrné erozivní opotřebení kulového ventilu. [9]



Obr. 2.10. Erozivní opotřebení kulového ventilu [9]

### 2.2.4 Kavitační opotřebení

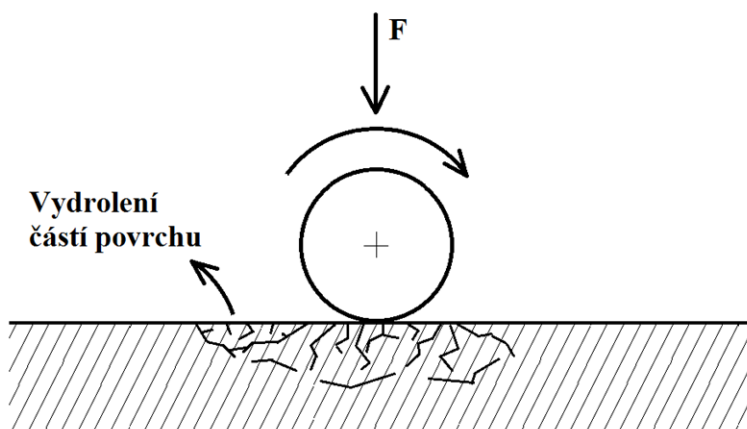
Kavitační opotřebení vzniká implozí bublinek, tzv. kavitačních dutin, vzniklých při lokálním podtlaku v kapalině. Tento jev nastane například za malým výstupkem v potrubí. U tohoto výstupku vznikne rychlostí proudící kapaliny tak vysoký podtlak, že se začnou tvořit malé bublinky nasycených par kapaliny. Bublínky putují potrubím dál a po přechodu do míst s vyšším tlakem dochází k jejich stlačování až zániku. Pokud tyto kavitační dutiny implodují v bezprostřední blízkosti povrchu materiálu, dojde k elastické a plastické deformaci povrchu. Při opakovaném namáhání dochází k vysokocyklové únavě materiálu a dále k oddělování částí povrchu materiálu, ten pak způsobuje další opotřebení, především abrazivní. Implodze kavitačních bublin znázorňuje Obr. 2.11. [1; 2; 10]



Obr. 2.11. Model imploze sférické kavitační bubliny [10]

### 2.2.5 Únavové opotřebení

Při opakovaném namáhání materiálu vzniká množství poruch krystalové mřížky. Vlivem kumulace těchto poruch dochází k prasklinám, vylamování či celkovým lomům součástí. Pokud je napětí v materiálu pod mezí kluzu, nazývá se pak vysokocyklovou únavou materiálu. Jestliže jde o namáhání v oblasti plastické deformace, považuje se za nízkocyklovou únavu materiálu. Tento jev je častý zejména u valivých ložisek či nástrojů pracujících s vibracemi, jako jsou pneumatická kladiva, vrtací korunky, apod. U materiálů s nízkou plasticitou může vlivem těchto povrchových poruch docházet až ke křehkému lomu. Křehký lom může vést k poruše nebo havárii celého stroje. To jsou důvody, proč je potřeba se tohoto opotřebení vyvarovat, a to zejména vhodnou konstrukcí zařízení, či volbou vhodného materiálu. [1; 2] Schéma únavového opotřebení je znázorněno na Obr. 2.12.



Obr. 2.12. Model únavového opotřebení cyklicky namáhaného povrchu součásti. F – přitlačná síla

### 2.2.6 Vibrační opotřebení

Ke vzniku vibračního opotřebení dochází na plochách součástí, které konají vzájemný tangenciální pohyb o malé amplitudě (0,1 až 100  $\mu\text{m}$ ). Vlivem malé amplitudy mezi povrchy zůstávají vzniklé produkty mezi styčnými plochami, pokud ale amplituda přesáhne cca 100  $\mu\text{m}$ , začne docházet k odstraňování částic otěru z oblasti kontaktu a místo vibračního opotřebení zde probíhá opotřebení adhezivní. U ocelových součástí mají tyto produkty typicky



hnědé, červenohnědé až černohnědé zbarvení, a proto je často vibrační opotřebení zaměňováno s výsledky korozního působení okolní atmosféry. Vibrační opotřebení vzniká v oblasti nerovností styčných ploch. Dochází zde k mikrospojům, které se vibracemi opětovně porušují. Zpočátku dochází vlivem elastických i plastických deformací ke zpevnění povrchové vrstvy styčných ploch, které se vlivem vyčerpání plasticity materiálu začnou rozpadat a vytvořené mikročástice působí abrazivně na oba povrchy (3 - body abraze). [1; 2; 11]

Na obrázku 2.13 [12] je patrné vibrační opotřebení způsobené uvolněním ložiska na hřídeli.



Obr. 2.13. Vibrační opotřebení mezi ložiskem a hřídelí – obrázek kroužku ložiska [12]

## 2.3 Odolnost a ochrana materiálů proti opotřebení

V této práci bude stručně pojednáváno pouze o odolnosti proti opotřebení ocelí. Dále jsou uvedeny tabulky s hodnotami odolnosti proti abrazivnímu opotřebení, které byly pro obecný přehled převzaty z literatury. [13]

### 2.3.1 Oceli obvyklých jakostí

Používají se velmi často pro svou dobrou dostupnost a snadné zpracování. Vyrábí se v množství druhů polotovarů a některé se dají dále zušlechťovat. Jejich otěruvzdornost je vzhledem k nízké tvrdosti malá. U ocelí s vyšším obsahem uhlíku lze součást tepelně zpracovat, např. zušlechtěním a tím zvýšit hodnotu tvrdosti a pevnosti. Některé z typických hodnot otěruvzdornosti uvádí tabulka 2.1. [13]

Hodnoty  $\psi_{a1}$  a  $\psi_{a2}$  jsou hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení, kde poměr udává použitý etalon. Čím vyšší hodnota, tím vyšší odolnost proti abrazivnímu opotřebení.

Tab. 2.1. Vybrané oceli obvyklých jakostí a jejich hodnoty otěruvzdornosti [13]

Ocel	Tepelné zpracování	Tvrdost [HV]	$\psi_{a1}$	$\psi_{a2}$
11500	Ž860°C/vzduch	175	1,17	1,48
	Ž860°C/vzduch + P400°C	172	1,17	1,56
	K870°C/olej	506	1,55	1,86
11600	Ž840°C/vzduch	202	1,25	1,60
	Ž840°C/vzduch + P400°C	203	1,24	1,55
	K830°C/olej	616	-	2,35
11800	Ž810°C/vzduch	316	1,52	2,23
	K810°C/olej + P400°C	447	1,38	2,32
	K810°C/olej	680	2,07	4,37
Pozn.: $\psi_{a1}$ = hodnoty z přístroje s brusným plátnem, $\psi_{a2}$ = hodnoty z přístroje s pryžovým kotoučem. Etalonem je ocel 12014 (95 - 105 HV), Ž - žíháno, K - kaleno, P - popouštěno				

### 2.3.2 Ušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli

Vyšší odolnost proti opotřebení v porovnání s ocelmi obvyklých jakostí poskytují ušlechtilé uhlíkové oceli třídy 12 dle ČSN. Obvykle se používají oceli s vyšším obsahem uhlíku v kaleném a popouštěném stavu. Díky jejich povrchové tvrdosti jsou tyto oceli proti běžným ocelím třídy 11 dle ČSN lepší. Vybrané druhy jsou zobrazeny v tabulce 2.2. [13]

Tab. 2.2. Vybrané ušlechtilé oceli a jejich hodnoty otěruvzdornosti [13]

Ocel	Tepelné zpracování	Tvrdost [HV]	$\psi_{a1}$	$\psi_{a2}$
12050	Ž830°C/vzduch	200	1,32	-
	K860°C/olej + P200°C	423	1,76	-
	K810°C/voda	638	1,93	-
12060	Ž830°C/vzduch	225	1,32	1,95
	Ž830°C/olej + P400°C	360	1,52	3,45
	K830°C/olej	674	2,20	5,10
12061	Ž830°C/vzduch	287	1,50	3,32
	K810°C/teplá voda + P550°C	331	1,50	1,99
	K810°C/teplá voda	851	2,46	6,37
Etalonem je ocel 12014 (95-105 HV), Ž - žíháno, K - kaleno, P - popouštěno				



### 2.3.3 Nízkolegované konstrukční oceli

Nízkolegované konstrukční oceli se dají rozdělit na dvě skupiny. První jsou oceli vhodné pro chemicko-tepelné zpracování, druhé jsou vhodné pro zušlechťování. [13]

Oceli s 0,3-0,42 % C se používají v případech, kdy rozhodující roli mají mechanické vlastnosti. Jejich odolnost proti abrazivnímu opotřebení není podstatně zvýšena v porovnání s ocelmi obvyklých jakostí. [13]

S rostoucím obsahem uhlíku se zvyšuje tvrdost po zušlechťování se zachováním houževnatosti, a proto se nízkolegované oceli s 0,45-0,5 % uhlíku používají například pro ozubená kola, drážkované hřídele apod. Pokud je obsah uhlíku v oceli od 0,5 do 0,62 %, dosahuje se po zušlechťování vysokých hodnot tvrdosti a ocel dobře odolává adhezivnímu a únavovému opotřebení. [13]

U dalších nízkolegovaných ocelí tříd 13,14,15 a 16 dle ČSN nemá obsah legujících prvků zásadní vliv na otěruvzdornost. Nejlepších výsledků otěruvzdornosti bylo dosaženo na zušlechťovaných ocelích s nejvyšším obsahem uhlíku. Viz. Tab. 2.3. [13]

Tab. 2.3. Vybrané nízkolegované oceli tříd 13, 14, 15 a 16 dle ČSN s nejlepšími výsledky otěruvzdornosti [13]

Ocel	Obsah C [%]	Tepelné zpracování	Tvrdost [HV]	$\Psi_{a1}$	$\Psi_{a2}$
13180	0,76	K840°C/olej	825	2,93	-
13242	0,43	K860°C/olej	790	1,98	-
14160	0,55	K820°C/olej	738	2,05	4,30
14240	0,36	K860°C/olej	608	2,10	-
15260	0,49	K840°C/olej	674	2,08	6,52
15261	0,61	K820°C/voda	825	2,22	5,45
16640	0,34	K830°C/vzduch + P180°C	547	1,80	2,53
16720	0,165	Ž950°C/vzduch + Ž850°C/vzduch	407	1,53	1,92
Etalonem je ocel 12014 (95-105 HV), Ž - žhánko, K - kaleno, P - popouštěno					

### 2.4 Ochrana proti opotřebení

Způsobů ochrany proti opotřebení je mnoho. Každý má své výhody a nevýhody, oblasti použití a ochranu při různém druhu opotřebení. Patří sem způsoby ochrany od vhodné volby základního materiálu, přes chemicko-tepelné zpracování, povlaky, nástřiky, mechanické zpevnění, návary, až po úpravu podmínek provozu. Tato práce se zabývá především abrazivním opotřebením.

Některé materiály jsou proti abrazivnímu opotřebení odolnější než jiné. Hlavní zásluhy ve většině aplikací odolných proti abrazivnímu opotřebení má tvrdost povrchu materiálu. Vlastností tvrdých materiálů ale bývá často také nepřilíživá vysoká houževnatost, případně se u nich vyskytuje zhoršená zpracovatelnost nebo vyšší cena. Proto je běžnější, že se výrobek (nebo jeho pracovní plochy), který pracuje v abrazivních podmínkách, chrání pouze povrchově. Pro vhodný výběr povrchové ochrany výrobku proti abrazivnímu opotřebení, je třeba dobře znát podmínky provozu. Povrchová úprava bude rozdílná pro zuby rypadla (kamení) a povrchovou úpravu kovoobráběcího nože. Jde především o velikost, tvrdost a tvar abrazivních částic a o silové účinky vzájemného působení těchto částic na funkční povrch součásti. Zatímco pro kovoobráběcí nože se hodí například nitridové povlaky (CVD, PVD), pro podmínky v důlním průmyslu se bude spíše hodit například tepelné, chemicko-tepelné zpracování anebo návary odolné proti abrazivnímu opotřebení. [1; 2; 13]

#### 2.4.1 Adhezivní opotřebení mezi dvěma kovovými povrchy

Je to příklad opotřebení dvou kovových součástí, které se po sobě odvalují, nebo kloužou. Jsou to typicky kluzná ložiska, články řetězů, řetězová kola. Dobrou ochranu proti takovému opotřebení poskytují martenzitické struktury.

Opotřebení adhezivní mezi dvěma povrchy stejné tvrdosti se ukazuje jako vyšší než při kontaktu ploch rozdílných tvrdostí. Doporučuje se pro třecí dvojici použít materiálů s rozdílným chemickým složením, rozdílnou tvrdostí povrchů a chemicky na sebe nepůsobících. U rozdílných tvrdostí použitých materiálů se více opotřebovává povrch měkčí. [14]

#### 2.4.2 Ochrana proti rázům nebo vysokým tlakům

Povrch vystavený rázovému namáhání či vysokým tlakům se na povrchu elasticky a plasticky deformuje a dochází k povrchové únavě povrchu. To může vést k vydrolování povrchu, či k iniciaci celkového lomu součásti a případné havárii stroje. Obvykle jsou tomuto namáhání vystavené stroje na drcení a mletí materiálu. Při přerušovaném tlakovém namáhání jsou tyto součásti většinou vystaveny také abrazi s částicemi mletého materiálu. Povrch těchto prvků musí být tvrdý a houževnatý do větších hloubek.

Vhodnou úpravou povrchu je navaření austenitickými manganovými materiály, které se deformací intenzivně zpevňují do větších hloubek. [14]

#### 2.4.3 Abraze jemnými minerálními částicemi (2 - body abraze)

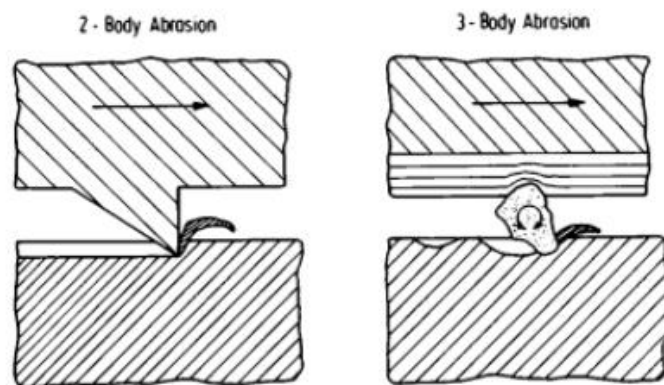
Toto opotřebení je způsobeno proudem ostrých tvrdých částic, které po povrchu kloužou za působení různých tlaků. Dochází k abrazi funkčního povrchu. Intenzita tohoto opotřebení je hlavně závislá na tvrdosti a zaoblení hran abrazivních částic. Čím tvrdší a ostrohrannější jsou abrazivní zrna, tím intenzivnější opotřebení povrchu.

Díky minoritnímu podílu rázů při tomto druhu opotřebení lze použít návary z velice tvrdých, ale zároveň křehkých materiálů, jako jsou vysokouhlíkové a chromové materiály, materiály s karbidickou strukturou. Ukázkou tohoto druhu opotřebení jsou lžíce nakladačů sypkých surovin nebo šnekové dopravníky a podobně. [14]

#### 2.4.4 Abraze mezi dvěma povrchy (3 - body abraze)

Pokud se ostré a tvrdé abrazivní částice dostanou mezi dva funkční povrchy, například drtiče či mlýnu, dochází zde k drcení a zadírání částic do funkčních ploch za vysokého tlaku. Ochranou je v tomto případě vysoká tvrdost funkčních povrchů.

Pro ochranu před tímto druhem opotřebení se používají materiály s vysokou tvrdostí, jako jsou austenitické manganové slitiny, martenzitické materiály a slitiny s jemnou karbidickou strukturou, obvykle karbidu titanu. [14]



Obr. 2.14. 2 - body abraze a 3 - body abraze [8]

## 2.5 Navařování otěruvzdornými materiály

Navařování je jedna z možností, jak chránit povrch opotřebovávané součásti. Ve velké části případů se jedná o renovaci již opotřebovaných ploch, ale opatřením odolným náwarem je možno chránit také výrobky nové. Pokud je potřeba na povrchu, či jeho části, odolná vrstva, ale v jádře musí být výrobek houževnatý, odolný proti rázům a podobně, je možné exponovanou plochu opatřit tvrdým či jinak specifickým náwarem již při výrobě. Dalším ukazatelem je cena výroby. Pokud je levnější vyrobít dílec z levnějšího materiálu a opatřit ho povrchovou vrstvou nebo povlakem, které splňují potřebné specifikace, pak je navaření odolného materiálu jednou z možností ochrany výrobku. [15]

Navařovat lze prakticky všemi svařovacími procesy, klíčové jsou ale návarové slitiny, které se svými vlastnostmi velice liší, a technologické postupy navařování. Jako stěžejní se jeví výběr vhodné návarové slitiny. Tu je možné vybrat pouze za předpokladu, že je znám druh opotřebení a základní materiál uvažovaného dílce. Dalším kritériem pro výběr návarového materiálu je také druh metody svařovacího procesu. Nejčastěji se tvrdé návarové slitiny navařují pomocí kyslíko-acetylenového plamene, nebo elektrickým obloukem. [15; 16]

Nejobvyklejší metody technologie pro navařování jsou: [14]

Svařování obalnými elektrodami (SMAW/111)

Svařování plněnou elektrodou (FCAW/114)

Svařování pod tavidlem (SAW/12x)

Elektrostruskové svařování (72)

### 2.5.1 Typy návarových materiálů

Návarové slitiny se dají rozdělit do několika skupin podle jejich charakteristických vlastností a odolnosti proti opotřebení. [14]

*„Skupiny podle složení:*

*Na bázi železa:*

- *martenzitické slitiny*
- *austenitické slitiny*
- *slitiny s vysokým obsahem karbidů*

*Neželezné slitiny:*

- *slitiny na bázi kobaltu*
- *slitiny na bázi niklu*

*Jejich vlastnosti vzhledem k opotřebení:*

*Martenzitické:*

*Tyto typy se používají na obnovu tvaru i jako tvrdonávary:*

- *dobrá odolnost při opotřebení typu kov-kov*
- *dobrá odolnost proti rázům*
- *přijatelná odolnost proti abrazi*

*Austenitické:*

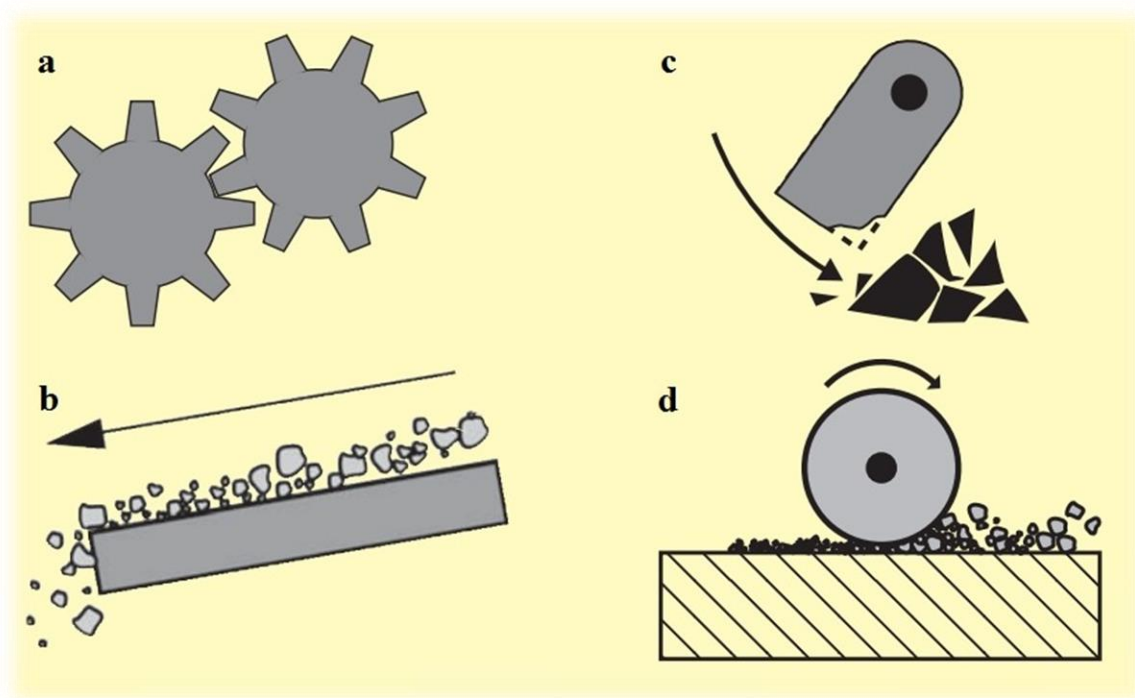
- *vynikající odolnost proti rázům*
- *dobrý materiál na obnovu tvaru*
- *přijatelná odolnost proti abrazi*

*S obsahem karbidů:*

- *výborná odolnost proti abrazi*
- *dobrá odolnost za tepla*
- *přijatelná odolnost proti korozi*
- *slabá odolnost proti rázům*

*Slitiny na bázi kobaltu a niklu:*

*Tyto slitiny odolávají většině typů opotřebení. V důsledku vysoké ceny se používají jen v případech, kdy jsou jejich vlastnosti ekonomicky opodstatněné, jako jsou vysokoteplotní aplikace, kdy mají slitiny na bázi železa s vysokým obsahem karbidů nedostatečnou odolnost. Niklové slitiny jsou o něco levnější alternativou.“ [14, s. 45]*



Obr. 2.15. Schematické znázornění opotřebení: a) opotřebení kov – kov, b) abrazivní opotřebení volnými částicemi, c) rázy, d) abraze mezi dvěma povrchy [14]

## 2.6 Hodnocení odolnosti materiálů proti abrazi

Testování materiálů na odolnost proti abrazi probíhá v laboratorních podmínkách, kde je snaha za relativně krátký čas zjistit odolnost proti opotřebení dané součásti. V provozu ale statické podmínky nejsou. Intenzita opotřebení se proto v provozních podmínkách liší od těch laboratorních. Laboratorní testování odolnosti proti abrazi mají řadu výhod proti provozním zkouškám - jejich provedení je relativně levné, lze snadno řídit jejich parametry a také je možné za krátký čas vyzkoušet velkou škálu různých materiálů. [2; 13]

Pro hodnocení odolnosti součástí proti opotřebení se používá několik základních veličin, které jsou uvedeny v tabulce 2.4

Tab. 2.4 Měřené veličiny v opotřebení [2]

Způsob měření	Veličina	Jednotka	Rychlost otěru		Otěr na jednotku dráhy (x)	
			Veličina	Jednotka	Veličina	Jednotka
Přímo měřené	Délkový otěr $W_1$	$\mu\text{m}$	$W_1/t$	$\mu\text{m.s}^{-1}$	$W_1/x$	$\mu\text{m.m}^{-1}$
	Hmotnostní otěr $W_h$	mg	$W_h/t$	$\text{mg.s}^{-1}$	$W_h/x$	$\text{mg.m}^{-1}$
	Objemový otěr $W_o$	$\text{mm}^3$	$W_o/t$	$\text{mm}^3.\text{s}^{-1}$	$W_o/x$	$\text{mm}^3.\text{m}^{-1}$
Poměrné	$\psi_1 = W_1 \text{ etalonu} / W_1 \text{ vzorku}$	1	$\psi_{1t}$	1	$\psi_{1x}$	1
	$\psi_h = W_h \text{ etalonu} / W_h \text{ vzorku}$	1	$\psi_{ht}$	1	$\psi_{hx}$	1
	$\psi_o = W_o \text{ etalonu} / W_o \text{ vzorku}$	1	$\psi_{ot}$	1	$\psi_{ox}$	1

## 2.7 Přístroje pro testování odolnosti proti abrazi

Existuje mnoho metod pro testování odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení.

Základním rozdělením může být:

- přístroje s vázanými částicemi
- přístroje s volnými částicemi
- přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy
- zařízení modelující procesy abraze v reálných podmínkách provozu

Schematické znázornění běžných přístrojů pro testování odolnosti proti abrazi je na obrázku 2.20.

### 2.7.1 Přístroje s vázanými abrazivními částicemi

Přístroje s vázanými částicemi mohou být například ve formě brusného plátna či hrotu specifického tvaru. Hroty se používají především ke studiu tribologických vlastností povlaků apod. Přístroje využívající brusné plátno ať již ve formě pásu, nebo ve formě kotouče se používají pro testy odolnosti proti abrazi nejčastěji. Jejich nevýhodou ale je nutnost velkého množství srovnávacích etalonů, kvůli degradující abrazivitě plátna, jehož zrna se postupně otupují. [2; 13; 17]

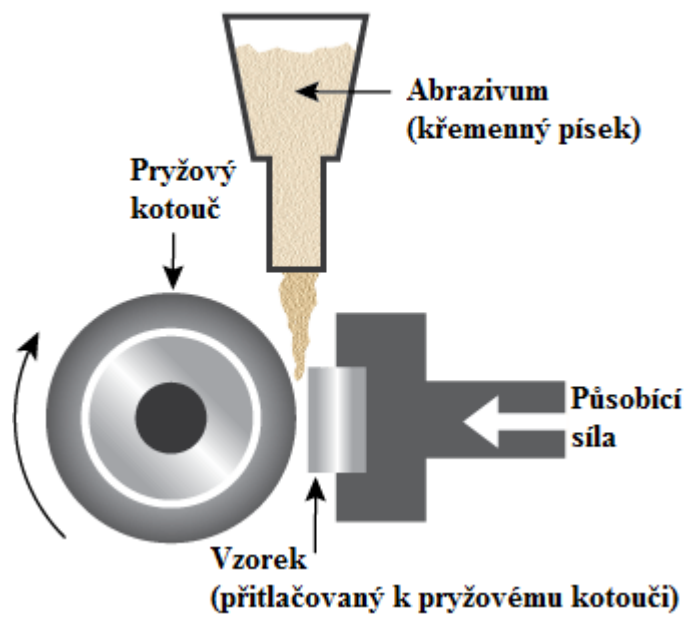
### 2.7.2 Přístroje s volnými abrazivními částicemi

Přístroje s volnými částicemi lze rozdělit dále na přístroje s brusnou nádobou, bubnové přístroje a na přístroje s pružným kotoučem. Přístroje s brusnou nádobou se skládají z nádoby naplněné abrazivem, ve které je ponořený zkušební vzorek. Vzorek a nádoba se vzájemně pohybují a tím dochází k obrušování vzorku. Výhodou těchto zařízení je možnost použít množství druhů abraziva z reálných podmínek a zkoušení i za vysokých teplot. Nevýhodou je pak malá intenzita opotřebovávání vzorků a postupné otupování abraziva, což se řeší periodickou výměnou abrazivního média. [2; 13]

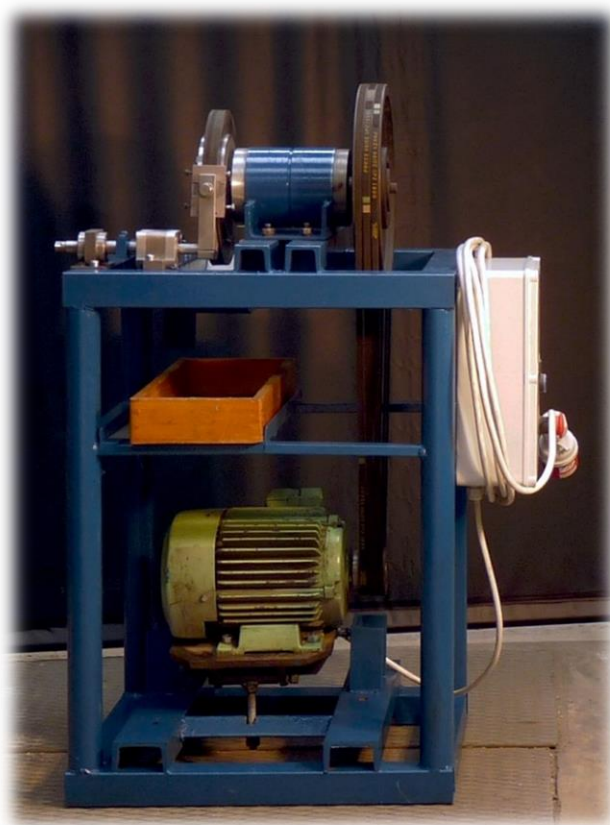
Bubnové přístroje jsou velmi jednoduché a spolehlivé. Možnou nevýhodou by mohla být větší časová náročnost zkoušek a omezená aplikovatelnost zjištěných dat. [13]

### 2.7.3 Přístroj s pryžovým kotoučem

Přístroj se skládá z pryžového kotouče a vzorku, který je k němu přitlačován. Pryžový kotouč se otáčí předem danou rychlostí po předem stanovenou dobu. Tryskou jsou přiváděny abrazivní částice mezi vzorek a kotouč. Tímto se modelují podmínky blízké těm provozním. Nevýhodou tohoto zařízení je nízká reprodukovatelnost experimentálních výsledků při použití abraziva s různou velikostí částic. Abrazi pak konají pouze částice velké a ty malé pouze prochází, ale nepůsobí na povrch vzorku. [2; 13] Schematické znázornění na obr. 2.16. [18]

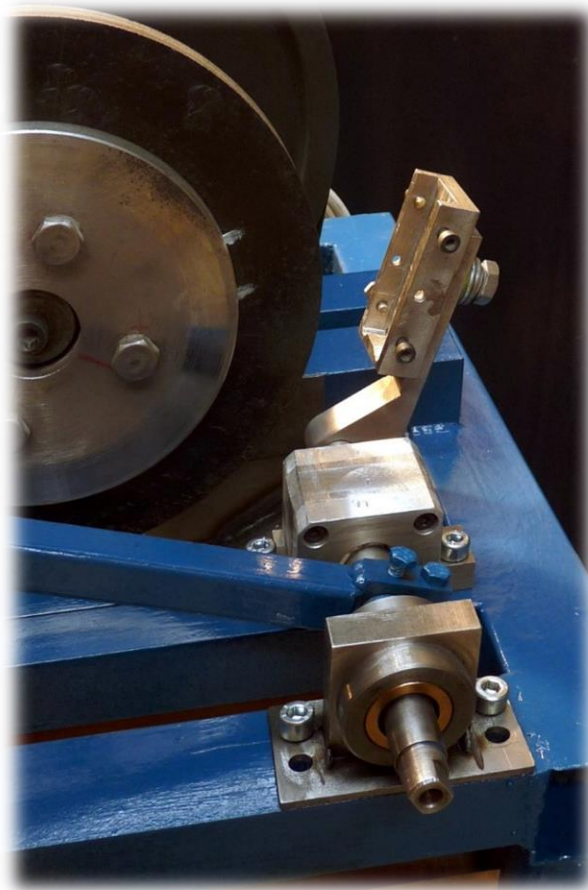


Obr. 2.16. Schéma přístroje s pryžovým kotoučem [18]



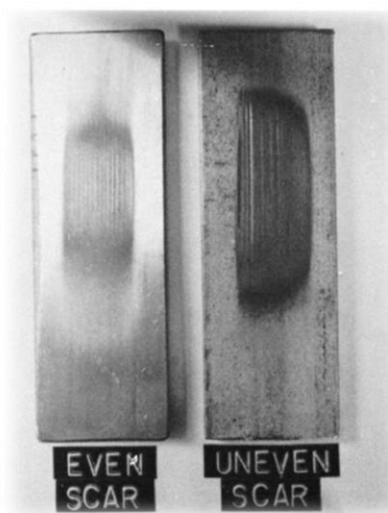
Obr. 2.17. Přístroj s pryžovým kotoučem





Obr. 2.18. Detail pákového mechanismu přístroje s pryžovým kotoučem

Vzorek je před zkouškou zvážen, dále je upnut do testovacího přístroje a opotřebováván abrazivem po předem stanovenou dobu. Poté je opět zvážen a z rozdílu vah se vypočte úbytek materiálu. Tento úbytek materiálu je porovnáván s úbytkem materiálu na etalonových vzorcích. [2; 13]. Obr. 2.19. [19] zobrazuje správný a špatný tvar plochy otěru.



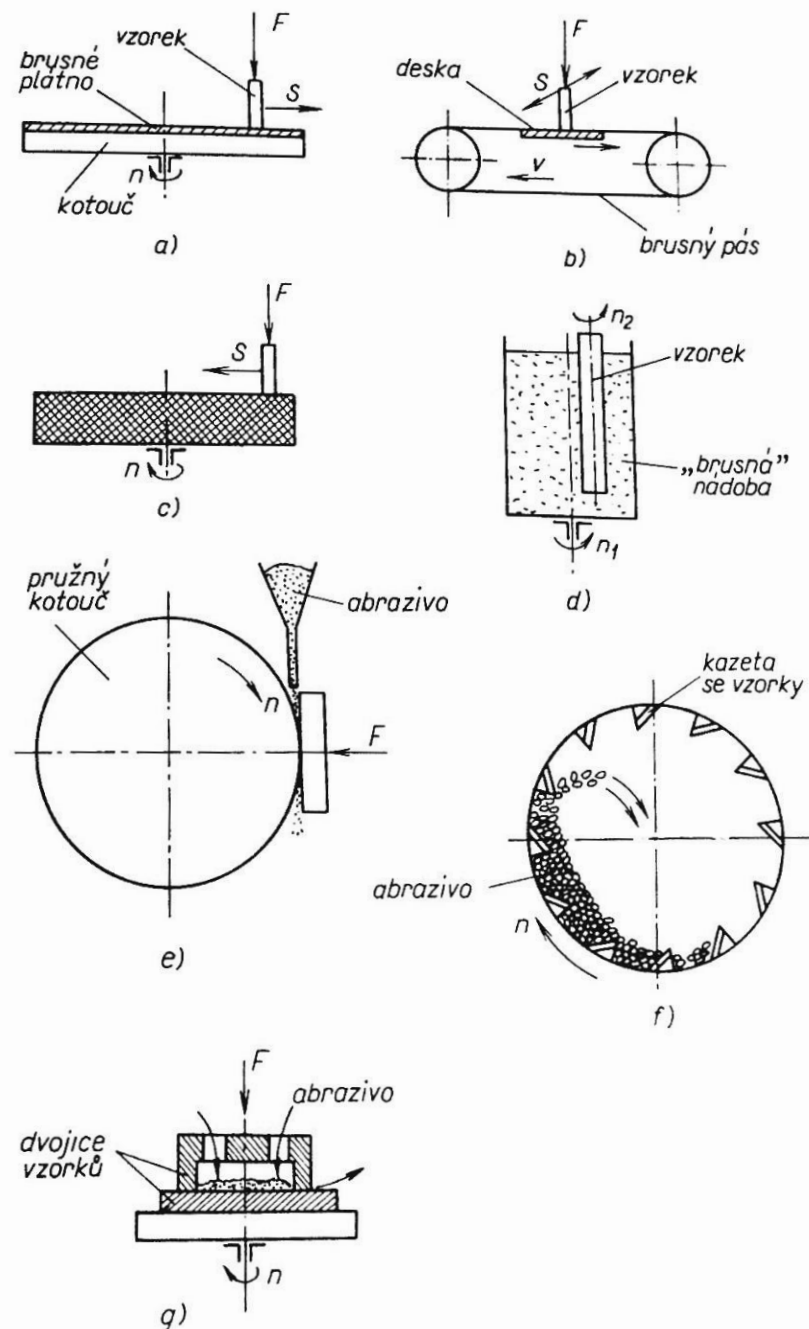
Obr. 2.19 Tvary ploch otěru po testu - vlevo správný, vpravo nesprávný [19]



#### 2.7.4 Přístroje s vrstvou částic mezi dvěma stykovými povrchy a přístroje pro testování reálných podmínek provozu

Přístroje s vrstvou částic mezi dvěma stykovými povrchy se používají pro testy tzv. 3 - body abraze. U těchto přístrojů činí problémy nerovnoměrnost vrstvy abrazivních částic a také přísun částic nových. [2; 13]

Přístroje pro testy specifických či provozních podmínek jsou prováděny za účelem zjištění přesných dat pro konkrétní provozní podmínky. Tyto přístroje jsou ale náročné na výrobu a je velmi obtížné jimi získaná data porovnávat s ostatními. [2; 13]



Obr. 2.20 Schéma přístrojů na zkoušky proti odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení: a) přístroj s brusným plátnem, b) přístroj s brusným pásem, c) přístroj s brusným kotoučem, d) přístroj s „brusnou“ nádobou, e) přístroj s pružným kotoučem, f) bubnový přístroj, g) přístroj s vrstvou brusných částic mezi dvěma stykovými povrchy [2]

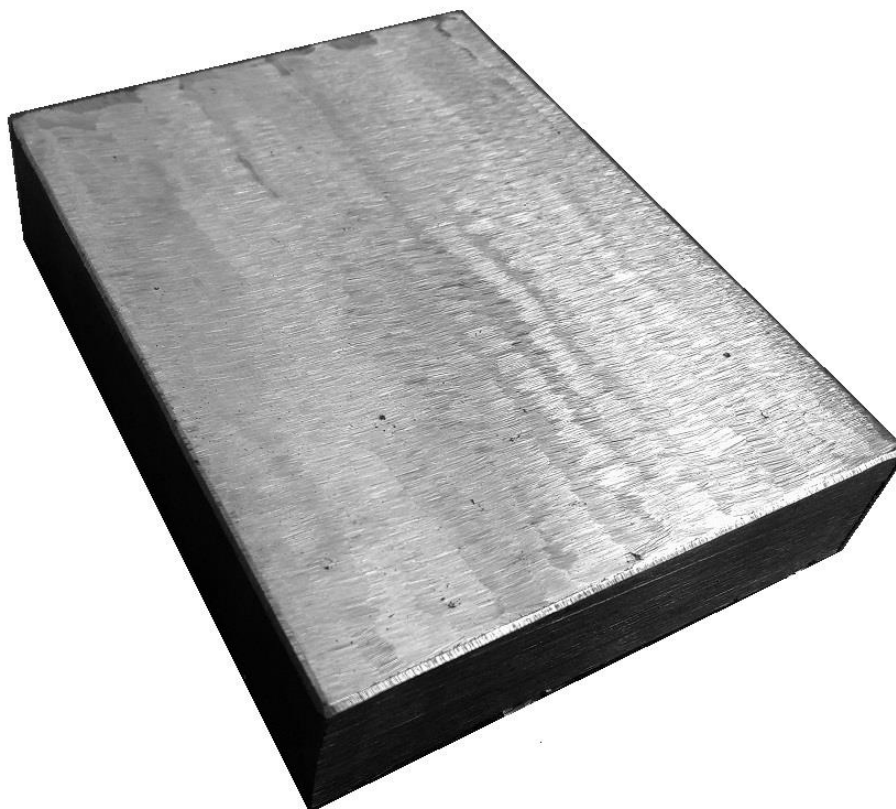
### 3 Praktická část

Práce má za cíl zjistit hodnoty odolnosti proti abrazivnímu opotřebení u čtyř druhů návarů zhotovených obalenými elektrodami. Tyto hodnoty v dostupné literatuře nejsou známy. Hodnoty byly zjištěny na přístroji s pryžovým kotoučem sestrojeným podle normy ASTM G65.

Navařování bylo provedeno ručně v běžných podmínkách provozu.

#### 3.1 Výběr a příprava vzorků před navařováním

Na podklad pro návary byla vybrána ocel dle ČSN 41 1373, která je ekvivalentem oceli S235JR podle ČSN EN 10025-2, jejíž složení bylo ověřeno spektrální analýzou. Podklad pro návary byl ve formě válcovaného plechu o tloušťce 20 mm. Plech byl nařezán na pásové pile na desky obdélníkového tvaru o rozměrech cca 130x100mm. Povrch plechu byl řádně obroušen úhlovou bruskou s brusným kotoučem do kovového lesku. Takto připravený vzorek byl nakonec odmaštěn. Obr. 3.1.



Obr. 3.1. Deska z materiálu ČSN 41 1373 připravená na navařování

#### 3.2 Druhy navařovaných materiálů

Přídavné materiály byly zvoleny čtyři v podobě různých druhů a průměrů obalených elektrod. Od každého druhu elektrody byly navařeny tři vzorky pro alespoň základní ověření vlastností návarů. Návarové slitiny byly voleny pro různé druhy namáhání.

### 3.2.1 ESAB OK 83.28

Je chromem legovaná elektroda, která se používá na opravy hřídelů, válců, výhybek i kolejových drah. Lze s ní navařovat i kalitelné oceli. Obal je bazický a elektroda se připojuje na kladný pól svářečního zdroje. Výrobce udává tvrdost návaru třetí vrstvy 30 HRC, odolnost proti rázům jako velmi dobrou, odolnost kov – kov jako dobrou, dobrá je i obrobitelnost. [20]

Chemické složení elektrody je v tabulce 3.1.

Tab. 3.1. Chemické složení svarového kovu zhotoveného elektrodou ESAB OK 83.28

Prvek	C	Si	Mn	Cr
% (hm.)	0,1	<0,7	0,7	3,2

Průměr obalené elektrody: 5 mm  
Délka: 450 mm  
Svařovací proud doporučený výrobcem byl v rozmezí: 190-260 A.  
Interpass: <90 °C

### 3.2.2 ESAB OK 84.78

Obalená elektroda vysoce legovaná chromem. Návar dle informací výrobce vyniká odolností proti abrazi pískem, štěrkem, rudou a uhlím. Obal je rutil-bazický, elektroda se připojuje na kladný pól. Návar je korozivzdorný až do teploty 1000°C. Tvrdost třetí vrstvy návaru bez předeřevu je udávána jako 59-63 HRC. Tato elektroda je vhodná pro navařování součástí zemních a důlních strojů. [20]

Chemické složení elektrody je v tabulce 3.2.

Tab. 3.2. Chemické složení svarového kovu zhotoveného elektrodou ESAB OK 84.78

Prvek	C	Si	Mn	Cr
% (hm.)	4,5	0,8	<1,6	33,0

Průměr obalené elektrody: 2,5 mm  
Délka: 350 mm  
Svařovací proud doporučený výrobcem byl v rozmezí: 90-120 A.  
Interpass: 100 °C

### 3.2.3 ESAB OK 84.84

Návary touto elektrodou jsou složeny z velkého podílu jemných karbidů a martenzitické matrice. Návar odolává abrazivnímu opotřebení, a to již v první vrstvě díky malému promísení se základním materiálem. Tyto návary se hodí na důlní vrtáky, kladiva, zuby rýpadel apod. Výrobce udává jako typickou tvrdost návaru na nelegovaném ocelovém podkladu hodnotu 62HRC. Odolnost proti abrazi je udávána jako výborná a odolnost proti rázům jako velmi dobrá. Obrábět se dá pouze broušením. Obal je bazický a elektroda se může připojit na kladný i záporný pól svařovacího zdroje. [20]

Chemické složení elektrody je v tabulce 3.3

Tab. 3.3. Chemické složení svarového kovu zhotoveného elektrodou ESAB OK 84.84

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Ti	V
% (hm.)	3,00	2,0	0,3	6,3	4,8	5,0

Průměr obalené elektrody: 3,2 mm  
Délka: 350 mm  
Svařovací proud doporučený výrobcem byl v rozmezí: 100-150 A.  
Interpass: není udáno

### 3.2.4 ESAB OK 86.08

Elektroda poskytuje otěruvzdorný návar s vysokým obsahem manganu, a proto se hodí do aplikací, kde je zapotřebí kombinace odolnosti proti abrazivnímu opotřebení a vysoké houževnatosti. Materiál s vysokým obsahem manganu se při plastické deformaci na povrchu přemění na martenzitickou strukturu a tím se zpevní. Hodí se proto na aplikaci pro čelist'ové drtiče, kladiva apod. Obal je bazický a elektrodu je možné připojit na kladný pól svařovacího zdroje. Tvrdost první vrstvy výrobce udává jako hodnotu 180-250 HB a druhou vrstvu v hodnotách 44-48 HRC. Je deklarována výborná odolnost proti rázům, dobrá odolnost proti opotřebení kov- kov. Obrábět se dá pouze broušením. [20; 21]

Chemické složení elektrody je v tabulce 3.4

Tab. 3.4. Chemické složení svarového kovu zhotoveného elektrodou ESAB OK 86.08

Prvek	C	Si	Mn
% (hm.)	0,9	0,8	13,0

Průměr obalené elektrody: 3,2 mm  
Délka: 450 mm  
Svařovací proud doporučený výrobcem byl v rozmezí: 95-135 A.  
Interpass: 100-150 °C

## 3.3 Provádění návarů

Návary byly prováděny ručně na předeřhřáté předem připravené desky. Všechny typy návarů byly navařeny ve třech vrstvách kromě typu OK 84.84, který byl navařen pouze ve dvou vrstvách. Návary byly aplikovány na očištěný a odmaštěný povrch. Materiály byly navařovány v přibližné velikosti konečných vzorků pro přístroj s pryžovým kotoučem (65x35 mm).

Elektroda 83.28 byla navařována proudem 235 A ve třech vrstvách na desky předeřhřáté na 200°C. Elektrody byly přesušeny po dobu 2 hodin při 200 °C (dle doporučení výrobce).

Elektroda 84.78 byla navařována proudem 110 A ve třech vrstvách na desky předeřhřáté na 200°C. Elektrody byly přesušeny stejně jako u elektrody 83.28.

Elektroda 84.84 byla navařována proudem 150 A ve dvou vrstvách na desky předehřáté na 250 °C po předchozím neúspěšném pokusu návary zhotovit za stejných podmínek jako u ostatních typů elektrod. Přesušení elektrod bylo stejné jako u ostatních.

Elektroda 86.08 byla navařována proudem 130 A ve třech vrstvách na desky předehřáté na 200 °C a elektrody přesušené na 200 °C/2 hodiny.

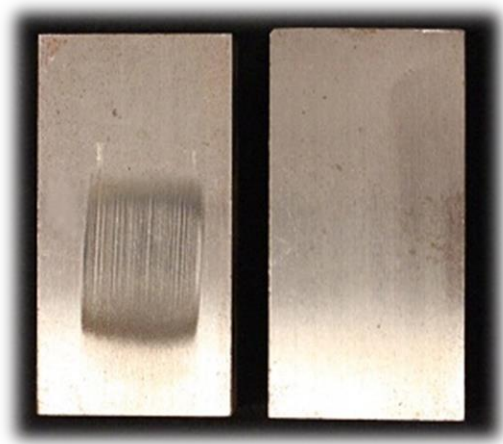
U návarů byla dotykovým termočlánkem kontrolována teplota interpass po každé svarové housence před započítáním housenky nové. Teplota interpass byla záměrně o něco překračována z důvodu tloušťky základního materiálu po několika neúspěšných návarech. Chladnutí návarů bylo volně na vzduchu při teplotě okolí 25 °C. Měření času navařování a následné určení vneseného tepla do materiálu nebylo z kapacitních důvodů provedeno.

### 3.4 Obrábění vzorků po navařování

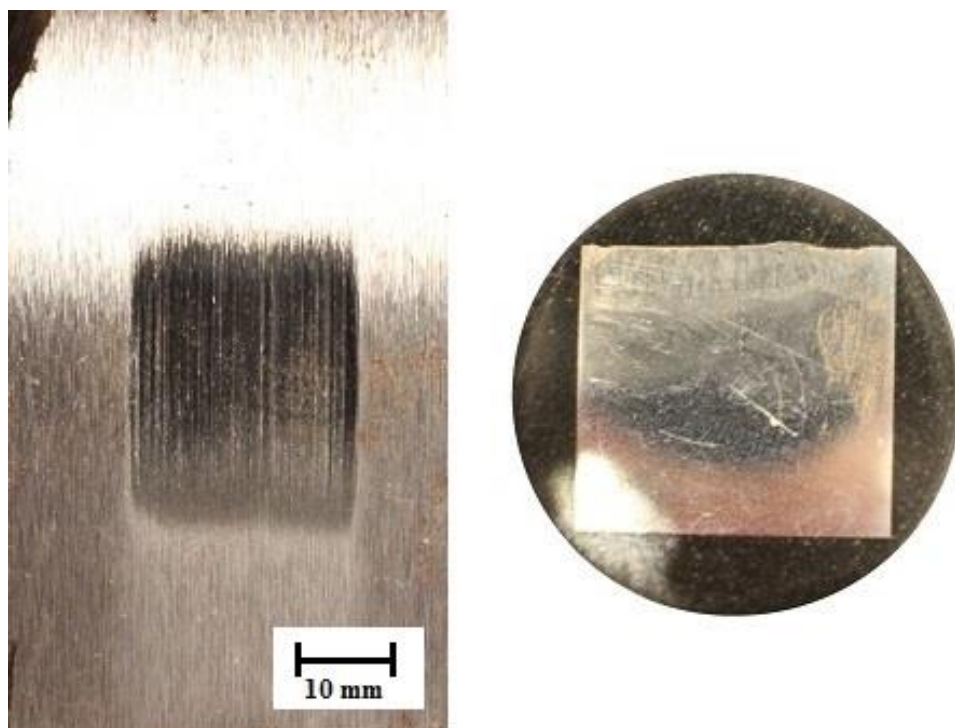
Vzorky byly po navaření zmenšeny na metalografické chlazené pile na rozměr 55x35 mm. Běžný rozměr je sice 65x35 mm, ale tyto vzorky byly zkráceny s ohledem na maximální přípustné zatížení přesné váhy, na které se vážily úbytky materiálu po testování. Dále byly na metalografické pile odříznuty plátky pro metalografickou analýzu. Ořezané vzorky se následně ofrézovaly ze strany, kde nebyl zhotoven návar, do roviny a poté byly obroušeny povrchy návarů. Návary byly obroušeny na chlazené brusce na kulato samoostřícím kotoučem řeznou rychlostí 30 m/s za intenzivního chlazení návaru chladicí kapalinou. Návary byly broušeny co nejméně, ale tak, aby na jejich povrchu vznikla plocha dostatečně velká pro otestování oteruvzdornosti na přístroji s pryžovým kotoučem.

Vzhledem k velké nerovnoměrnosti ručně zhotovených návarů nebylo možné přesně zaznamenat hodnotu úbytku návaru broušením, ale později z výsledků měření makrotvrdosti vyplynulo, že makrotvrdost se výrazně neměnila až do hloubek několika milimetrů. Všechny návary byly zbroušeny minimálně o jeden milimetr. Výrazných úbytků broušením došlo u návarů zhotovených elektrodami typu OK 84.84 a OK 84.78. U těchto druhů elektrod byly návary od nejvyšších vrcholků zbroušeny cca o 3 milimetry. Makrotvrdost v těchto hloubkách dosahovala stejných hodnot jako na povrchu.

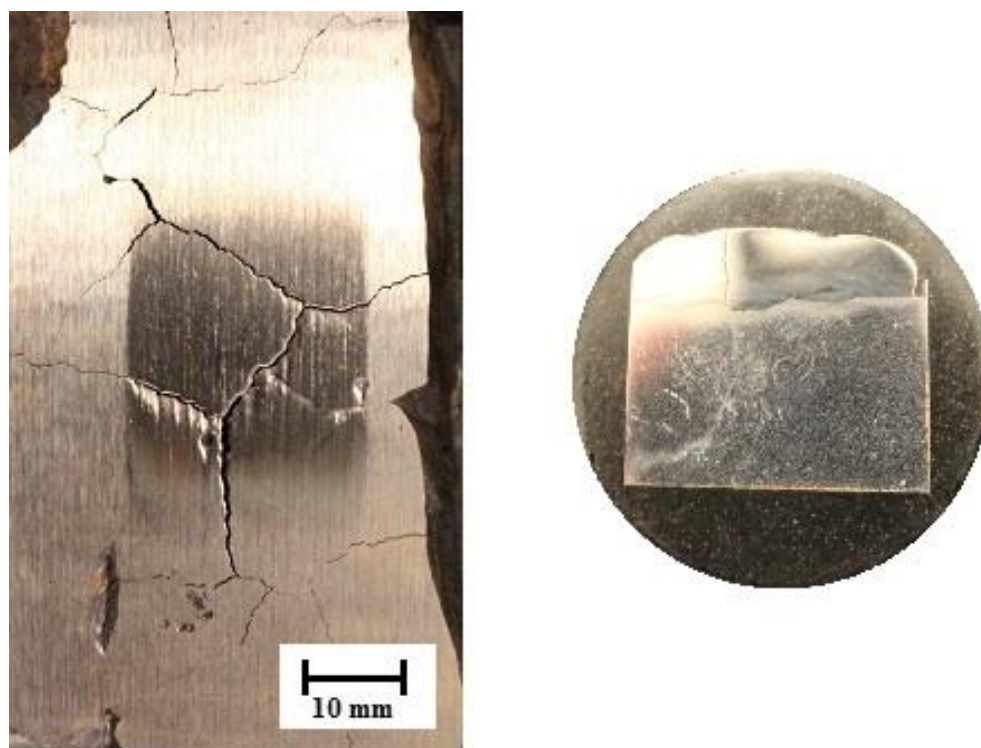
Po obroušení návarů do roviny byly následně všechny vzorky z druhé strany ofrézovány na tloušťku cca 12 milimetrů tak, aby jejich hmotnost nepřesáhla 190 g z důvodu maximální dovolené hmotnosti přesných vah (210g), na kterých byly měřeny výsledky testu odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Výsledný vzhled otestované plochy je znázorněn na Obr. 3.2-3.6.



Obr. 3.2. Otestovaný a neotestovaný etalon z materiálu ČSN 41 2050 (C45)

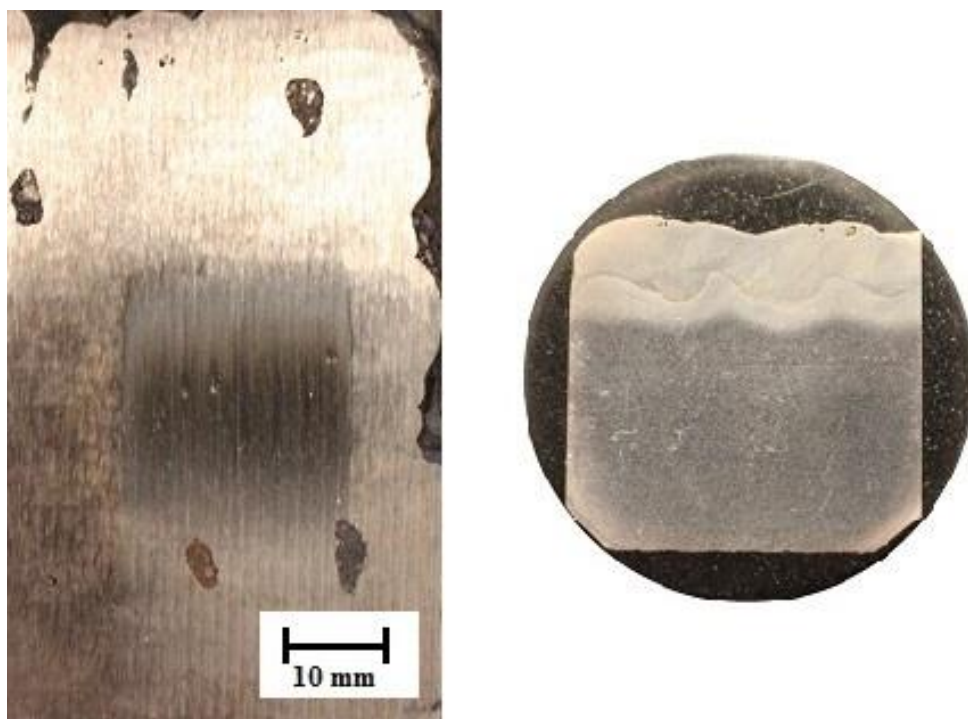


Obr. 3.3. Otestovaný vzorek návaru 83.28 a metalografický výbrus vpravo

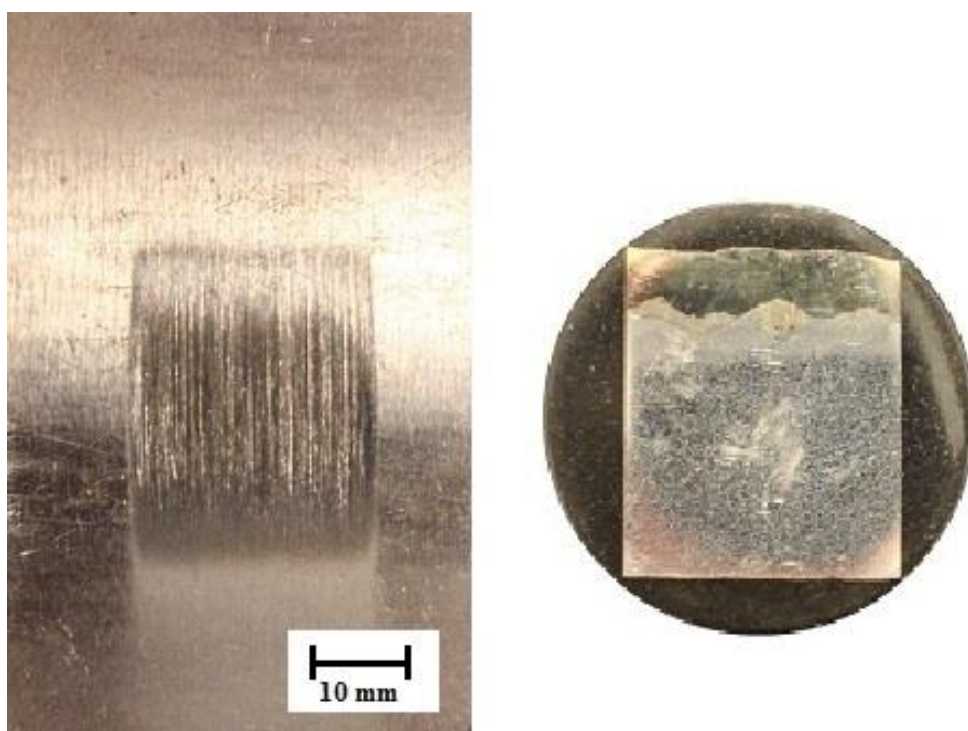


Obr. 3.4. Otestovaný vzorek návaru 84.78 a metalografický výbrus vpravo





Obr. 3.5. Otestovaný vzorek návaru 84.84 a metalografický výbrus vpravo

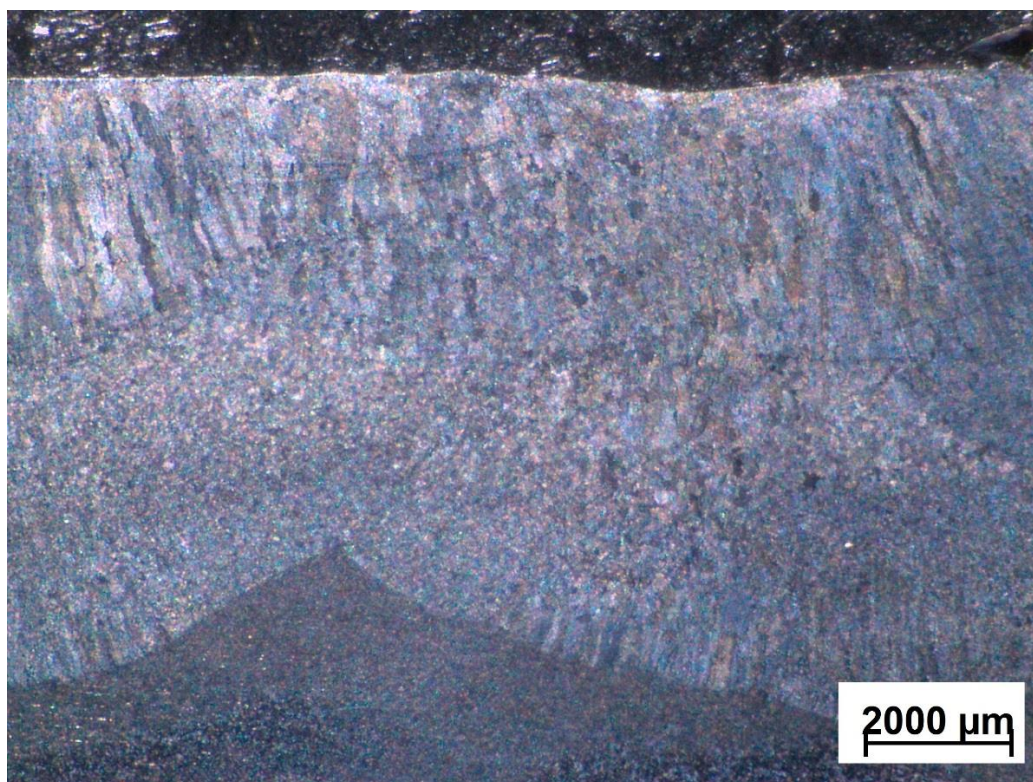


Obr. 3.6. Otestovaný vzorek návaru 86.08 a metalografický výbrus vpravo

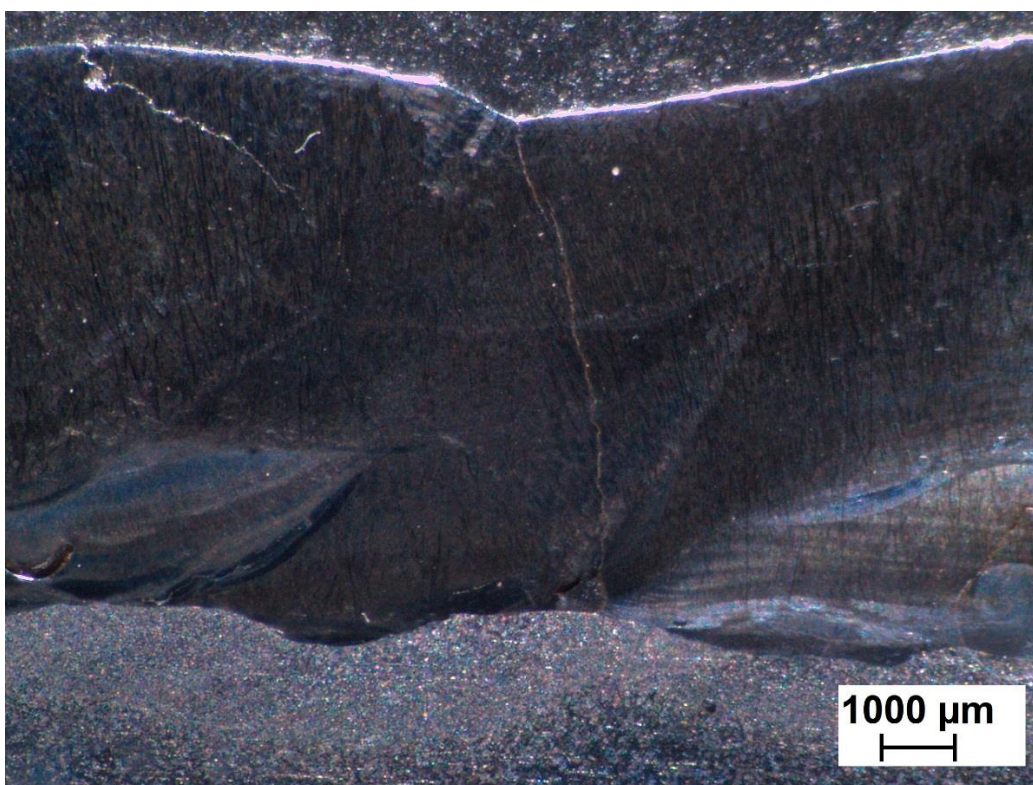


### 3.5 Metalografická analýza

Z každého vzorku byl uříznut plátek, který byl následně vyleštěn a naleptán kyselinou dusičnou (Nital). Z těchto metalografických výbrusů jsou vybrány reprezentativní fotografie pro zhodnocení makrostruktury jednotlivých druhů návarů.

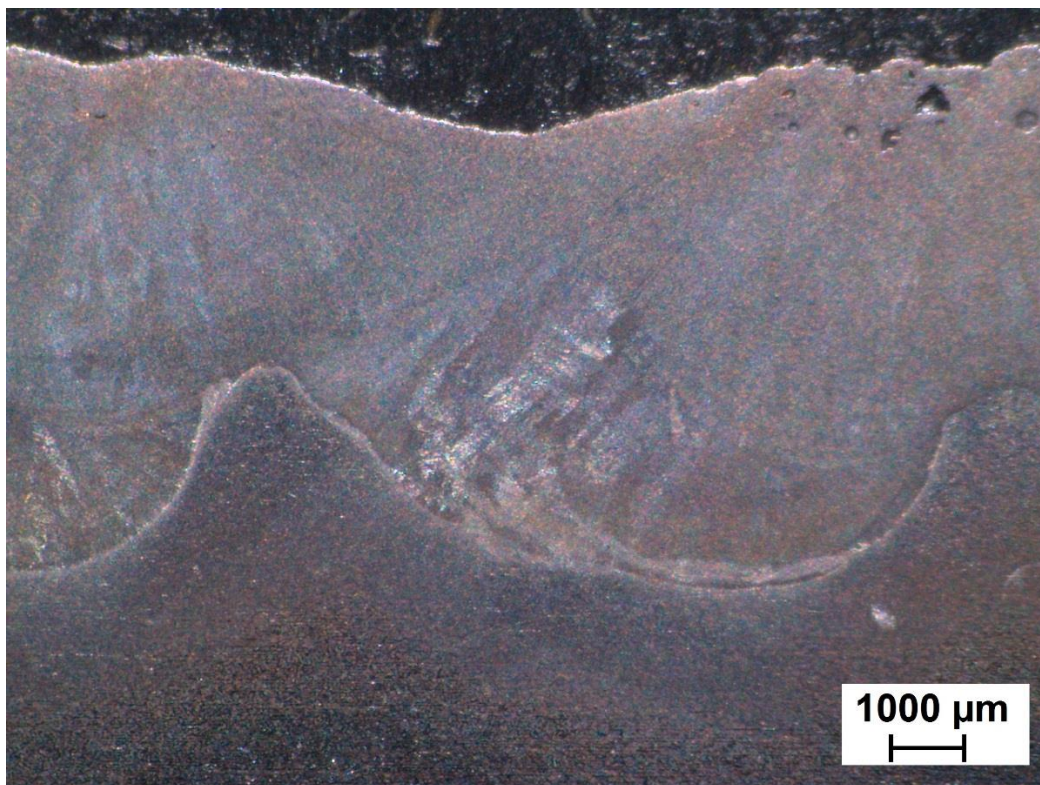


Obr. 3.7. Makrostruktura vzorku 83.28 3

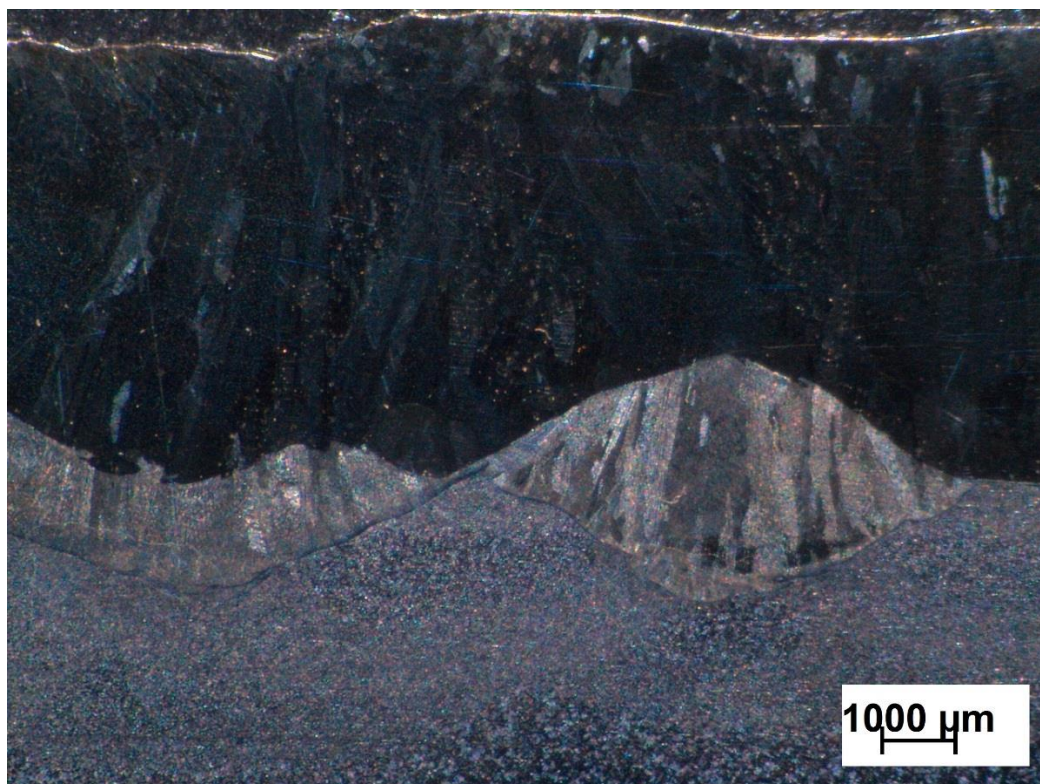


Obr. 3.8. Makrostruktura vzorku 84.78 2





Obr. 3.9. Makrostruktura vzorku 84.84 2



Obr. 3.10. Makrostruktura vzorku 86.08 1

### 3.5.1 Makrotvrdost

Metalografické výbrusy každého vzorku byly podrobeny testu makrotvrdosti metodou podle Vickerse při zatížení 1 kg (HV1). Průběhy tvrdostí jsou znázorněny v tabulce 11.1. Měření makrotvrdosti bylo ukončeno vždy po naměření hodnoty tvrdosti podkladového materiálu třikrát po sobě.

Tab. 3.5. Výsledky měření makrotvrdosti vzorků

HV1												
Vzorek	83.28	83.28	83.28	84.78	84.78	84.78	84.84	84.84	84.84	86.08	86.08	86.08
Hloubka měření pod povrchem	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 mm	277	262	262	706	640	664	730	719	720	233	234	245
2 mm	279	273	274	675	631	730	694	730	737	217	213	230
3 mm	286	265	271	674	598	669	669	721	743	213	224	240
4 mm	283	266	232	549	646	674	655	717	746	222	229	237
5 mm	274	228	220	697	604	569	646	658	716	223	463	234
6 mm	278	191	232	593	626	653	640	524	706	281	489	241
7 mm	254	182	240	592	660	560	644	172	748	283	154	169
8 mm	164	166	238	699	714	636	686	167	184	258	157	168
9 mm	159	162	169	170	174	176	171	157	171	146	162	157
10 mm	150	154	159	155	168	162	161		177	154		
11 mm			154	158	158	153	151			160		

Z výsledků je zřejmé, že přibližně odpovídají tvrdostem udávaným výrobcem návarových elektrod. U všech druhů návarů bylo dosaženo velmi malé promísení se základním materiálem. U vzorku 86.08 2 byla v hloubce 5 a 6 mm naměřena dvojnásobná tvrdost oproti povrchovým vrstvám návaru. Toto bylo zřejmě způsobeno nepřesným měřením, nebo náhodou, kdy došlo k dotyku indentoru přesně v místě, kde byl materiál lokálně tvrdší.

### 3.6 Testování vzorků na přístroji s pryžovým kotoučem a výsledky měření

Testování vzorků proběhlo na přístroji s pryžovým kotoučem za těchto podmínek:

Obvodová rychlost kotouče: 2,62 m/s  
 Dráha otěru abrazivními částicemi: 1000 m  
 Čas zkoušky jednoho vzorku: 6 min. 22 s  
 Abrazivum: Slévárenský formovací křemenný písek, frakce 0,3 mm.  
 Rychlost sypání abraziva: 260 g/min  
 Přítlačná síla vzorku ke kotouči: 130 N

Všechny vzorky byly podrobeny testu stejných parametrů. Jako etalon byla zvolena ocel dle ČSN 41 2050 (C45) normalizačně žíhaná nařezaná ze čtyřhranné tyče na rozměr 55x28x15 mm. Pro každý druh návaru (4) byl použit jeden etalon. Všechny vzorky a etalony byly před a po testování zváženy na váze s přesností na čtyři desetinná místa. Z těchto údajů byl stanoven hmotnostní úbytek materiálu a následně poměrná odolnost proti opotřebení jednotlivých návarů. Vzorky byly zkoušeny tak, že se nejdříve otestoval etalon pro danou sadu a pak se zkoušce podrobila sada návarů od čísla 1 vzestupně. Po každé sadě byl pryžový kotouč orovnan, i když opotřebení na něm nebylo příliš znatelné.

Tab. 3.6. Naměřené hodnoty vzorku před zkouškou a po zkoušce s vyhodnocením poměrného a délkového opotřebení

vzorek	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]	$\Delta m$ [g]	$m_{1e}$ [g]	$m_{2e}$ [g]	$\Delta m_e$ [g]	$\psi_h$ [-]	$W_h$ [mg.m <sup>-1</sup> ]
<b>83.28 1</b>	163,9458	163,7710	0,1748	177,0148	176,9031	0,1117	0,64	0,175
<b>83.28 2</b>	167,4471	167,2951	0,152	177,0148	176,9031	0,1117	0,73	0,152
<b>83.28 3</b>	161,4283	161,2674	0,1609	177,0148	176,9031	0,1117	0,69	0,161
<b>84.78 1</b>	154,5559	154,5259	0,03	180,6606	180,5509	0,1097	3,66	0,030
<b>84.78 2</b>	155,3949	155,3659	0,029	180,6606	180,5509	0,1097	3,78	0,029
<b>84.78 3</b>	153,5557	153,5223	0,0334	180,6606	180,5509	0,1097	3,28	0,033
<b>84.84 1</b>	163,6286	163,6154	0,0132	180,3315	180,2391	0,0924	7,00	0,013
<b>84.84 2</b>	164,1703	164,1548	0,0155	180,3315	180,2391	0,0924	5,96	0,016
<b>84.84 3</b>	162,2301	162,2179	0,0122	180,3315	180,2391	0,0924	7,57	0,012
<b>86.08 1</b>	164,0933	163,9833	0,11	177,4819	177,3808	0,1011	0,92	0,110
<b>86.08 2</b>	172,2733	172,1745	0,0988	177,4819	177,3808	0,1011	1,02	0,099
<b>86.08 3</b>	165,8046	165,6982	0,1064	177,4819	177,3808	0,1011	0,95	0,106

Způsob výpočtů poměrových ukazatelů odolnosti proti abrazivnímu opotřebení:

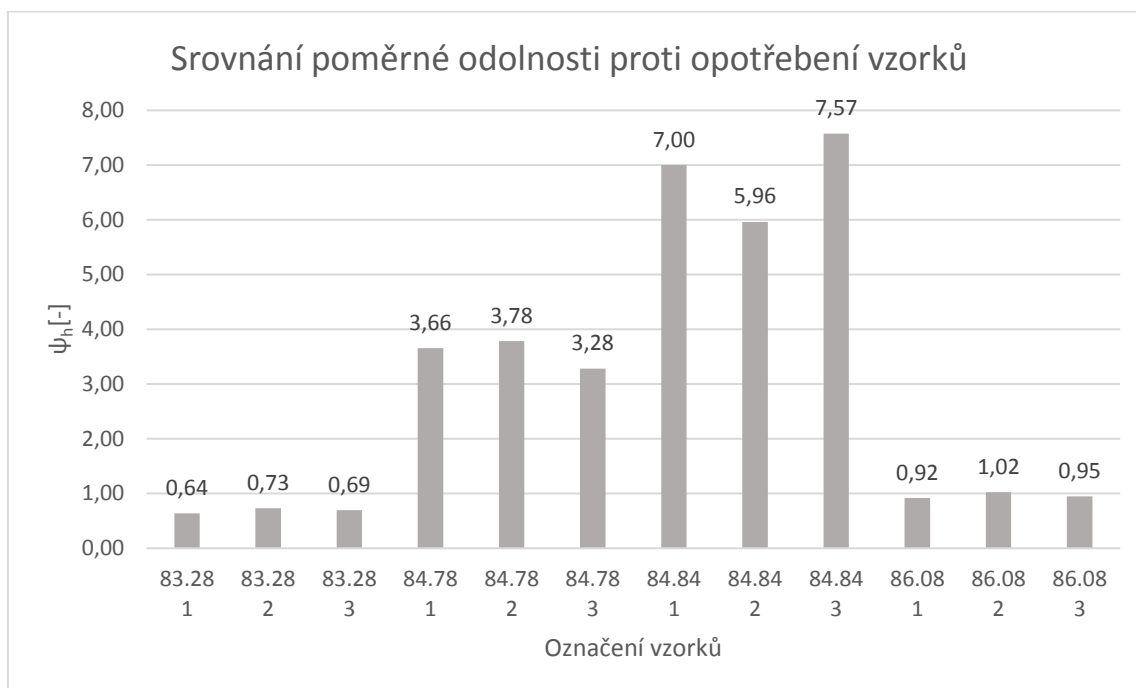
$$\psi_h = \frac{\Delta m_e}{\Delta m} [-]$$

Vztah 3.1. Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení [2]

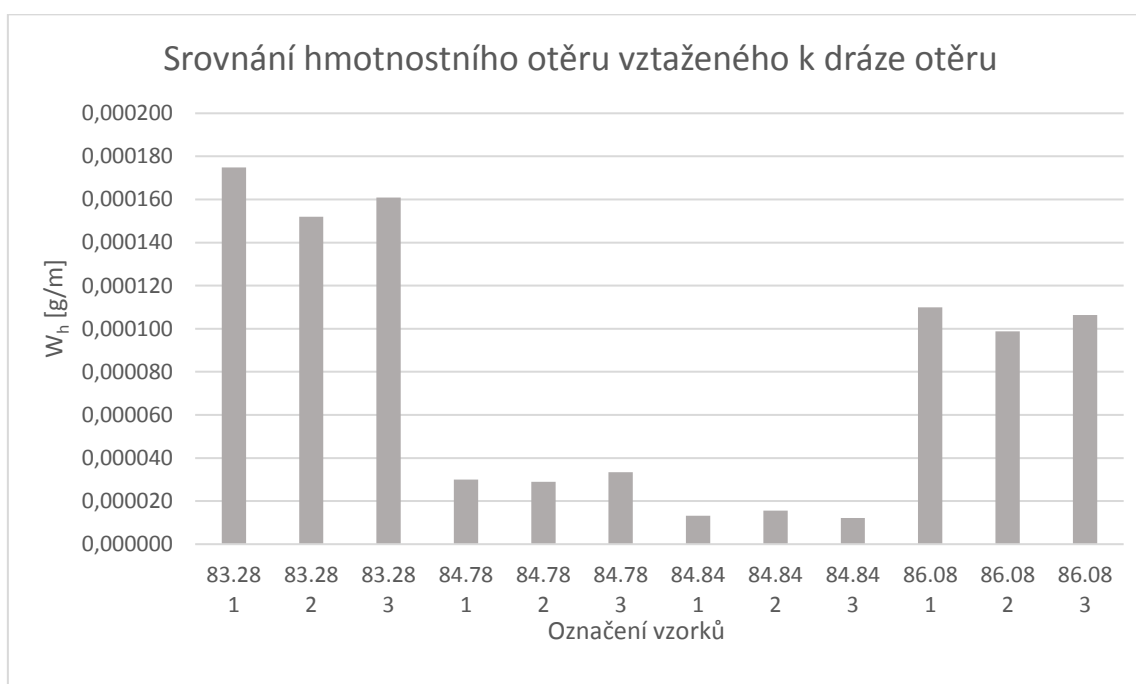
$$W_h = \frac{\Delta m \cdot 10^3}{l} [mg.m^{-1}]$$

Vztah 3.2. Hmotnostní ořez vztažený na dráhu ořezu [2]

- $m_1$ ... hmotnost vzorku před zkouškou
- $m_2$ ... hmotnost vzorku po zkoušce
- $\Delta m$ ... úbytek hmotnosti vzorku při zkoušce
- $m_{1e}$ ... hmotnost etalonu před zkouškou
- $m_{2e}$ ... hmotnost etalonu po zkoušce
- $\Delta m_e$ ... úbytek hmotnosti etalonu při zkoušce
- $\psi_h$ ... poměrná odolnost proti opotřebení
- $W_h$ ... hmotnostní ořez vztažený na délku ořezu
- $l$ ... délka ořezu (1000 m)



Obr. 3.11. Grafické znázornění poměrného opotřebení



Obr. 3.12. Grafické znázornění hmotnostního otěru

### 3.7 Zhodnocení experimentu

Nejlepší poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení měl podle očekávání návar s označením OK 84.84, což je struktura s „*množstvím jemných karbidů v martenzitické matici*“ [20]. U těchto návarů byla také naměřena nejvyšší tvrdost okolo 700 HV1. Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení těchto návarů byla v rozmezí od 5,96 do 7,57. Hmotnostní otěr těchto návarů se pohyboval v rozmezí 0,012-0,016 mg.m<sup>-1</sup>.

Přibližně polovičních hodnot odolnosti proti abrazivnímu opotřebení bylo dosaženo u návaru s typovým označením OK 84.78, což je návar s vysokým podílem chromu (33%). Tvrdost u těchto návarů dosahovala hodnot přibližně 640 HV1 a poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení byla v rozmezí od 3,28 do 3,78. Hmotnostní otěr se u návarů zhotovených touto elektrodou pohyboval v rozmezí 0,03-0,033 mg.m<sup>-1</sup>.

U návarů zhotovených elektrodou OK 86.08, což je elektroda legovaná manganem (13%), bylo dosaženo přibližně stejné poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení, kterých se dosáhlo u etalonů z oceli ČSN 41 2050. Měřením tvrdosti byly zjištěny hodnoty cca 230 HV1. Poměrná odolnost se zde pohybovala od 0,92 do 1,02. Hmotnostní otěr se u tohoto druhu návarů pohyboval v intervalu 0,099-0,11 mg.m<sup>-1</sup>.

Návary s označením OK 83.28, které se používají na opravy kolejových drah a mají dobrou odolnost proti rázům, se zhotovují chromem legovanou elektrodou (3,2%). Tato elektroda poskytuje odolný návar s přibližnou tvrdostí 30 HRC. Při měření byla zjištěna tvrdost 270 HV1 (cca 28 HRC). Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení byla v případě tohoto druhu návaru 0,64 až 0,73. Hmotnostní otěr byl u těchto vzorků určen jako interval 0,152- 0,175 mg.m<sup>-1</sup>.



## 4 Závěr

Opotřebení je normou ČSN 01 5050 definováno jako nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením dvou povrchů, nebo funkčního povrchu a média. To se může projevit úbytkem materiálu na funkčních plochách, případně jeho přemísťováním. Tyto úbytky mohou být způsobeny mechanickým, ale i například chemickým nebo elektrochemickým působením. Opotřebení je faktor, který způsobuje snížení produktivity, spolehlivosti, ale i kompletní havárii strojů. Snížení nebo zhoršení kvality produkce způsobuje finanční ztráty a může být rizikem i z bezpečnostního hlediska.

Bakalářská práce se zabývá abrazivním opotřebením a návary odolnými proti tomuto druhu opotřebení. Byly popsány základní druhy opotřebení s větší pozorností k opotřebením abrazivnímu. Rámcově popsány byly také výrobní a návarové materiály s určením vhodnosti těchto materiálů pro různé aplikace.

Bylo navařeno celkem dvanáct vzorků, tři od každého druhu návarového materiálu. Následně byly návary obrobena na požadovaný rozměr (váhu) pro test odolnosti proti abrazivnímu opotřebením na přístroji s pryžovým kotoučem (sestaveným dle ASTM G65).

Byla otestována poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebením. Nejvyšší hodnotu odolnosti proti abrazivnímu opotřebením poskytla slitina s vysokým podílem jemných karbidů chromu, titanu a vanadu v martenzitické matici. Tento druh návaru také, dle informací výrobce, nezpůsobuje vysoké promísení se základním materiálem, a tak jej lze i aplikovat pouze v jedné vrstvě. Pro testování byly navařeny vrstvy dvě. U ostatních druhů návarů byly navařeny tři vrstvy a hodnoty odolnosti proti abrazivnímu opotřebením u nich byly nižší, než u výše zmíněné slitiny. Návar s vysokým obsahem chromu (33 %) prokázal asi poloviční hodnotu odolnosti proti abrazi, než návar s karbidy v martenzitické matici. Návar také velmi popraskal, což je sice u tohoto druhu návarů běžné, ale činí tento druh návaru nepoužitelný pro aplikace s rázy. Návar s vyšším obsahem manganu nevykázal vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebením, ale je známo, že manganové slitiny se zpevňují plastickou deformací. Dá se očekávat, že by hodnota otěruvzdornosti po překování stoupla. U návarů na opravy kolejových drah (OK 83.28) byla míra odolnosti proti abrazivnímu opotřebením nižší, než u etalonového vzorku z oceli ČSN 41 2050.

## 5 Použité zdroje a literatura

- [1] BEČKA, Jan. *Tribologie*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01621-8.
- [2] VOCEL, Milan a Vladimír DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1976. Řada strojírenské literatury.
- [3] *DIN 50320:1979-12: Wear Terms Systematic Analysis Of Wear Processes Classification Of Wear Phenomena*. 12. vyd. Německo: Deutsches Institut für Normung, 1979.
- [4] DAVIS, J. *Surface engineering for corrosion and wear resistance*. 1. vyd. Materials Park, OH: IOM Communications, 2001. ISBN 08-71-70700-4.
- [5] ČSN 01 5050 *Opotřebení materiálu: Názvosloví*. 1. vyd. Československo: Úřad pro normalizaci a měření, 1968.
- [6] *Ložisková pánev: Degradace strojních součástí: Opotřebení adhezivní* [online]. In: . 2003 [cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://degradace.tf.czu.cz/AA/AA058d1.jpg>
- [7] SUCHÁNEK, Jan. *Abrazivní opotřebení kovových materiálů* [online]. Slovensko: TechPark, 2010, **2008**-(1) [cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>
- [8] ZUM GAHR, Karl-Heinz. *Microstructure and wear of materials*. New York: Elsevier, 1987. ISBN 0444427546.
- [9] *Kulový uzávěr: Degradace strojních součástí: Opotřebení erozivní* [online]. In: . ČR: Pošta Josef, 2003 [cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://degradace.tf.czu.cz/AE/AE003c1.jpg>
- [10] SUCHÁNEK, Jan. *Kavitační opotřebení* [online]. Slovensko: TechPark, 2011, (1) [cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12011/kavitacni-opotrebeni.html>
- [11] SUCHÁNEK, Jan. *Vibrační opotřebení* [online]. Slovensko, 2011, (2) [cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22011/vibracni-opotrebeni-.html>
- [12] Fretting. In: *NSK: Motion and Control* [online]. USA, b.r. [cit. 2017-07-26].
- [13] SUCHÁNEK, Jan, Vladimír KUKLÍK a Eva ZDRAVECKÁ. *Abrázivní opotřebení materiálů*. 1. vyd. Praha: [České vysoké učení technické], 2007. ISBN 9788001036594.
- [14] *Opravy a údržba: Svařovací materiály pro opravy a údržbu*. 6. akt. vyd. Vamberk: ESAB Vamberk, 2011.
- [15] LÖBL, Karel. *Navařování*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Knižnice strojírenské výroby.



- [16] LÖBL, Karel a Richard STÁREK. *Tvrdé návary v praxi*. 1. vyd. Praha: Ústav pro technické a ekonomické informace, 1957.
- [17] BŘEZINA, R. *The Laboratory Tests Of Abrasion* [online]. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, b.r., , 7 [cit. 2017-07-27]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/11574947-The-laboratory-tests-of-abrasion-laboratorni-zkousky-abrazivniho-opotrebeni.html>
- [18] Abrasive Wear Test ASTM G65. In: *Extreme Coatings* [online]. Petersburg, b.r. [cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://www.extremecoatings.net/resources/test-results/abrasive-wear-test-astm-g65.html>
- [19] *ASTM G65 - 4: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. West Conshohockem: ASTM International, 2010.
- [20] *Katalog přídavných materiálů pro svařování*. 5. Přep. a dop, vyd. Vamberk: ESAB Vamberk, 2012.
- [21] CHATTOPADHYAY, R. *Surface wear analysis, treatment, and prevention*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2001. ISBN 9781615030606.

## 6 Seznam obrázků

Obr. 2.1. Případy relativního pohybu těles [2] .....	12
Obr. 2.2. Stribeckovy křivky závislosti součinitele tření $\mu$ na rychlosti $u$ [1] .....	13
Obr. 2.3. Slovní rozdělení způsobů a podmínek styku těles [4] .....	14
Obr. 2.4. Rozdělení opotřebení podle Petera J. Blaua [4] .....	15
Obr. 2.5. Rozdělení způsobů opotřebení podle Kennetha G. Budinskiho [4] .....	15
Obr. 2.6. Schematické znázornění hlavních druhů opotřebení a charakteru poškození funkčních povrchů [1] .....	16
Obr. 2.7. Adhezivní opotřebení pánve kluzného ložiska [6] .....	17
Obr. 2.8. Působení brusného plátna na opotřebovávaný povrch [7] .....	18
Obr. 2.9. Zjednodušený model interakce abrazivní částice s opotřebovávaným povrchem podle Rabinowicze [7] .....	19
Obr. 2.10. Erozivní opotřebení kulového ventilu [9] .....	21
Obr. 2.11. Model imploze sférické kavitační bubliny [10] .....	22
Obr. 2.12. Model únavového opotřebení cyklicky namáhaného povrchu součástí. $F$ – přítláčná síla .....	22
Obr. 2.13. Vibrační opotřebení mezi ložiskem a hřídelí – obrázek kroužku ložiska [12] .....	23
Obr. 2.14. 2 - body abraze a 3 - body abraze [8] .....	27
Obr. 2.15. Schematické znázornění opotřebení: a) opotřebení kov – kov, b) abrazivní opotřebení volnými částicemi, c) rázy, d) abraze mezi dvěma povrchy [14] .....	29
Obr. 2.16. Schéma přístroje s pryžovým kotoučem [18] .....	31
Obr. 2.17. Přístroj s pryžovým kotoučem .....	31
Obr. 2.18. Detail pákového mechanismu přístroje s pryžovým kotoučem .....	32
Obr. 2.19 Tvary ploch otěru po testu - vlevo správný, vpravo nesprávný [19] .....	32

Obr. 2.20 Schéma přístrojů na zkoušky proti odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení: a) přístroj s brusným plátnem, b) přístroj s brusným pásem, c) přístroj s brusným kotoučem, d) přístroj s „brusnou“ nádobou, e) přístroj s pružným kotoučem, f) bubnový přístroj, g) přístroj s vrstvou brusných částic mezi dvěma stykovými povrchy [2] .....	34
Obr. 3.1. Deska z materiálu ČSN 41 1373 připravená na navařování .....	35
Obr. 3.2. Otestovaný a neotestovaný etalon z materiálu ČSN 41 2050 (C45) .....	38
Obr. 3.3. Otestovaný vzorek návaru 83.28 a metalografický výbrus vpravo .....	39
Obr. 3.4. Otestovaný vzorek návaru 84.78 a metalografický výbrus vpravo .....	39
Obr. 3.5. Otestovaný vzorek návaru 84.84 a metalografický výbrus vpravo .....	40
Obr. 3.6. Otestovaný vzorek návaru 86.08 a metalografický výbrus vpravo .....	40
Obr. 3.7. Makrostruktura vzorku 83.28 3 .....	41
Obr. 3.8. Makrostruktura vzorku 84.78 2 .....	41
Obr. 3.9. Makrostruktura vzorku 84.84 2 .....	42
Obr. 3.10. Makrostruktura vzorku 86.08 1 .....	42
Obr. 3.11. Grafické znázornění poměrného opotřebení .....	45
Obr. 3.12. Grafické znázornění hmotnostního otěru .....	45

## 7 Seznam vztahů

Vztah 2.1. Coulombův zákon [1] .....	11
Vztah 2.2. Vztah rovnováhy sil k obr. 3.7. [7] .....	19
Vztah 2.3. Objem materiálu odstraněný tělesem po dráze l [7] .....	19
Vztah 2.4. Celkový objem odstraněného materiálu [7] .....	20
Vztah 3.1. Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení [2] .....	44
Vztah 3.2. Hmotnostní otěr vztažený na dráhu otěru [2] .....	44

## 8 Seznam tabulek

Tab. 2.1. Vybrané oceli obvyklých jakostí a jejich hodnoty otěruvzdornosti [13] .....	24
Tab. 2.2. Vybrané ušlechtilé oceli a jejich hodnoty otěruvzdornosti [13] .....	24
Tab. 2.3. Vybrané nízkoalokované oceli tříd 13, 14, 15 a 16 dle ČSN s nejlepšími výsledky otěruvzdornosti [13] .....	25
Tab. 2.4 Měřené veličiny v opotřebení [2] .....	29
Tab. 3.1. Chemické složení svarového kovu zhotoveného elektrodou ESAB OK 83.28 .....	36
Tab. 3.2. Chemické složení svarového kovu zhotoveného elektrodou ESAB OK 84.78 .....	36
Tab. 3.3. Chemické složení svarového kovu zhotoveného elektrodou ESAB OK 84.84 .....	37
Tab. 3.4. Chemické složení svarového kovu zhotoveného elektrodou ESAB OK 86.08 .....	37
Tab. 3.5. Výsledky měření makrotvrdosti vzorků .....	43
Tab. 3.6. Naměřené hodnoty vzorku před zkouškou a po zkoušce s vyhodnocením poměrného a délkového opotřebení .....	44